



**TUGAS AKHIR – ME 141501**

**KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS PERANCANGAN  
*REEFER CONTAINER* BERBASIS TEKNOLOGI *PHASE  
CHANGE MATERIAL* UNTUK APLIKASI DI KAPAL**

**Herdito Haryowidagdo  
NRP 4214 106 009**

**Dosen Pembimbing  
Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK SISTEM PERKAPALAN  
FAKULTAS TEKNOLOGI KELAUTAN  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017**



**TUGAS AKHIR - ME 141501**

**KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS  
PERANCANGAN *REEFER CONTAINER*  
BERBASIS TEKNOLOGI *PHASE CHANGE*  
*MATERIAL* UNTUK APLIKASI DI KAPAL**

**HERDITO HARYOWIDAGDO  
NRP 4214 106 009**

**Dosen Pembimbing  
Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D**

**Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017**



**FINAL PROJECT - ME 141501**

# **TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF REEFER CONTAINER COOLING SYSTEM BASED ON PHASE CHANGE MATERIAL TECHNOLOGY**

**HERDITO HARYOWIDAGDO  
NRP 4214 106 009**

**Bachelor Thesis Supervisor  
Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D**

**Departement of Marine Engineering  
Faculty of Marine Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2017**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS PERANCANGAN**  
***REEFER CONTAINER* BERBASIS**  
**TEKNOLOGI *PHASE CHANGE MATERIAL* UNTUK**  
**APLIKASI DI KAPAL**  
**SKRIPSI.**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi *Marine Machinery and System* (MMS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**HERDITO HARYOWIDAGDO**  
NRP 4214106009

Disetujui oleh Pembimbing Skripsi:

Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D  
NIP. 19751006 200212 1 003



SURABAYA  
Januari, 2017

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS PERANCANGAN**  
**REEFER CONTAINER BERBASIS**  
**TEKNOLOGI PHASE CHANGE MATERIAL UNTUK**  
**APLIKASI DI KAPAL**  
**SKRIPSI.**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi *Marine Machinery and System* (MMS)  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Sistem Perkapalan  
Fakultas Teknologi Kelautan  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**HERDITO HARYOWIDAGDO**  
NRP 4214 106 009

Disetujui oleh

Kepala Departemen Teknik Sistem Perkapalan



Dr. Eng. Muhammad Badrus Zaman, S.T., M.T.  
NIP. 197708022008011007

SURABAYA  
Januari, 2017

*“Halaman Ini Sengaja Dikosongkan”*

## SURAT PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini menyatakan dengan sebenarnya bahwa :

*“Pada laporan tugas akhir yang saya susun ini, tidak terdapat tindakan plagiarisme dan menyatakan dengan sukarela bahwa semua data, konsep rancangan, bahan tulisan dan materi yang ada di laporan tersebut merupakan milik Laboratorium Marine Machinery and System (MMS) di Departemen Teknik Sistem Perkapalan ITS yang merupakan hasil studi penelitian dan berhak dipergunakan untuk pelaksanaan kegiatan penelitian lanjutan serta pengembangannya”.*

Nama	: Herdito Haryowidagdo
NRP	: 4214106009
Judul Tugas Akhir	: Kajian Teknis dan Ekonomis Perancangan <i>Reefer Container</i> Berbasis <i>Phase Change Material</i> Untuk Aplikasi di Kapal
Departemen	: Teknik Sistem Perkapalan
Fakultas	: Fakultas Teknologi Kelautan ITS

Apabila di kemudian hari terbukti terdapat tindakan plagiarisme, maka saya akan bertanggung jawab sepenuhnya dan menerima sanksi yang diberikan oleh ITS sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Surabaya, 23 Januari 2017

Herdito Haryowidagdo



*“HalamanIniSengajaDikosongkan”*

**KAJIAN TEKNIS DAN EKONOMIS PERANCANGAN *REEFER*  
CONTAINER BERBASIS TEKNOLOGI *PHASE CHANGE*  
MATERIAL UNTUK APLIKASI D KAPAL**

**Nama Mahasiswa** : Herdito Haryowidagdo  
**NRP** : 4214 106 009  
**Departemen** : Teknik Sistem Perkapalan, FTK-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D

**ABSTRAK**

Kontainer berpendingin (*reefer container*) merupakan kontainer pelayaran yang digunakan pada intermodal angkutan barang yang didinginkan untuk menunjang kegiatan transportasi pada muatan barang tertentu yang sensitive terhadap perubahan temperature lingkungan. Kandungan bahan refrigerant yang tidak ramah lingkungan menjadi masalah tersendiri dari penggunaan *reefer container* konvensional. Selain itu kebutuhan daya yang cukup besar juga mengurangi nilai ekonomis dari penggunaan *reefer container* ini, karena ketika kontainer diangkut masuk ke dalam ruang muat kapal dan kapal sedang berlayar, maka kontainer tersebut harus di *charging / reefer plugging* agar dapat mempertahankan temperature muatan di dalam kontainer.

Saat ini penggunaan teknologi untuk penyimpanan energi thermal aplikasi sistem refrigerasi yang banyak digunakan adalah *Phase Change Material (PCM)*. Dimana *PCM* mampu menyerap dan melepaskan sejumlah kalor laten berdasarkan perubahan kenaikan maupun penurunan temperature lingkungan sekitarnya. Keunggulan dari teknologi *PCM* ini adalah mampu menurunkan konsumsi energi dari sebuah mesin pendingin serta lebih ramah lingkungan sehingga mampu menghemat biaya pemakaian energi.

Pada tugas akhir ini, dilakukan analisa perhitungan performance *reefer container* pada mesin refrigerasi sistem konvensional dan mesin refrigerasi dengan sistem hybrid PCM. Analisa perhitungan difokuskan pada perbandingan kinerja / COP, perhitungan teknis untuk komponen sistem refrigerasi serta perbandingan biaya ekonomis dan operasional antara mesin pendingin dengan sistem konvensional dan mesin pendingin dengan sistem hybrid PCM,

Pada hasil analisa dan pembahasan diketahui bahwa perancangan *reefer container* dengan sistem hybrid ini mengacu pada standar ASHRAE 2005 dari segi teknis yang meliputi pemilihan pipa refrigerant, jenis fluida, bahan insulasi pelapis dinding kontainer serta *supporting pipeelements* untuk penambahan komponen PCM pada sistem refrigerasi di *reefer container*. Hasil yang diperoleh pada sistem hybrid PCM ini mampu menghemat pemakaian daya kompresor (*saving energy*) hingga 57,7 kW per hari per kontainer atau setara dengan penghematan 9,65 liter bahan bakar untuk kebutuhan konsumsi diesel generator set di kapal per hari. Dari sisi ekonomi diketahui *payback period* untuk memodifikasi *reefer container* dengan sistem hybrid PCM, baru dapat tercapai pada tahun ke 3 sebesar Rp. 34,290.519,96. Sedangkan *cummulative cash flow* untuk sistem hybrid ini dapat melampaui sistem konvensional pada tahun ke 5 hingga 10.

Kata kunci : *reefer container, phase change material, saving energy, fuel saving.*

# TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF REEFER CONTAINER COOLING SYSTEM BASED ON PHASE CHANGE MATERIAL TECHNOLOGY

**Student Name** : Herdito Haryowidagdo  
**NRP** : 4214 106 009  
**Department** : Marine Engineering, FTK ITS  
**Bachelor Thesis Supervisor** : Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D

## ABSTRACT

*Refrigerated container is a shipping container used in intermodal freight transport refrigerated to support the charge on certain goods that are sensitive to changes in environmental temperature ([www.gia.org.sg](http://www.gia.org.sg)). The properties of refrigerant that are not environmentally friendly be the other problem from the use of conventional reefer container. In addition it needs considerable power also reduces the economic value of the use of reefer container, since when the container is transported into the cargo hold space of ships and ship sail's, the containers must be in the charging / reefer plugging it in order to maintain the temperature inside the cargo container.*

*Today the use of technology for thermal energy storage applications refrigeration system that is widely used is the Phase Change Material (PCM). Where PCM is able to absorb and release a number of latent heat increase or decrease based on changes in the surrounding environment temperature. The advantages of the PCM technology is able to reduce the energy consumption of a refrigeration system as well as more environmentally friendly so as to save the cost of energy consumption.*

*In this thesis, the performance calculation analysis on the reefer container refrigeration machine of conventional systems and refrigeration machine with a hybrid system PCM. Calculation*

*analysis focused on the comparative performance / COP, technical calculations for the components of the refrigeration system as well as economic and operational cost comparison between conventional engine cooling system and engine cooling with PCM hybrid system.*

*On the results of the analysis and discussion in mind that the design of reefer container with a hybrid system refers to the standard ASHRAE 2005 from a technical perspective that includes the selection of pipe refrigerant, fluid type, insulation material lining the walls of container and supporting installation elements for adding the components PCM on a refrigeration system in reefer container. The results, PCM hybrid system is able to save the compressor power consumption (energy saving) to 57.7 kW per day per container, equivalent to savings of 9.65 liters of fuel for consumption on board diesel generator sets per day. From the economic side note payback period for modifying reefer container with PCM hybrid systems, can only be achieved in the 3rd year of Rp. 34,290.519,96. While cumulative cash flow for this hybrid system can go beyond conventional systems in the year to 5 to 10.*

*Keywords : reefer container, phase change material, saving energy, fuel saving.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmat serta Hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan Judul :

### **“Kajian Teknis dan Ekonomis Perancangan Reefer Container Berbasis Teknologi *Phase Change Material* Untuk Aplikasi di Kapal”**

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, maka pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ayah dan Ibu di rumah serta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan do'a dan kasih sayang nya kepada penulis, sehingga penulis bisa menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar.
2. Sutopo Purwono Fitri, S.T., M.Eng., Ph.D selaku Dosen Pembimbing skripsi serta atasan penulis di Dekanat FTK periode 2015-2019 yang telah memberikan kesempatan atas waktu bimbingan, bantuan, arahan, masukan, nasehat serta kesabarannya selama pengerjaan skripsi ini.
3. Prof. Daniel M. Rosyid, Ph.D., Prof. Eko Budi Djatmiko, Ph.D serta Dr.-Ing Setyo Nugroho selaku atasan penulis selama bekerja di Dekanat FTK yang telah memberikan izin dan kesempatan bagi penulis untuk melanjutkan studi hingga jenjang sarjana di ITS
4. Dr. Eng. Dhimas Widhi Handani, S.T., M.Sc. selaku dosen Wali selama menempuh pendidikan Strata-1 di Departemen Teknik Sistem Perkapalan, yang telah memberikan bimbingan, bantuan, arahan, masukan dan nasehat selama pengerjaan Tugas Akhir ini.

5. Dr. Eng. M. Badrus Zaman, S.T., M.T., selaku Ketua Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, yang telah memberikan kesempatan penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
6. Indra Ranu Kusuma, S.T., M.Sc., selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan ITS, yang telah memberikan kesempatan penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir.
7. Teman teman Lintas Jalur Siskal Angkatan 2014 yang selalu memberi dukungan dan semangat satu sama lain
8. Teman teman alumni D3 ME PPNS 2010, yang telah membantu penulis dalam mendapatkan data data skripsi dan memberikan masukan yang sangat bermanfaat.
9. Teman teman Tenaga Kependidikan di ITS, terutama Dekanat FTK yang selalu memberikan semangat dan dukungan kepada penulis untuk segera menyelesaikan skripsi ini.
10. Teman teman dan adik adik angkatan di Laboratorium Mesin Fluida dan Sistem, terima kasih atas dukungan, dan keceriaan nya selama di lab.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa laporan ini masih jauh dari kesempurnaan. Untuk itu adanya kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan penulisan selanjutnya.

Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi kita semua dan dapat menjadi tambahan ilmu dan pedoman untuk melakukan penulisan selanjutnya.

Surabaya, Januari 2017  
Penulis

## DAFTAR ISI

<b>LEMBAR PENGESAHAN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>ix</b>
<b><i>ABSTRACT</i> .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xx</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxii</b>
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
I.1 Latarbelakang .....	1
I.2 PerumusanMasalah .....	4
I.3 BatasanMasalah.....	4
I.4 TujuanPenelitian.....	5
I.5 Manfaat Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>7</b>
II.1 Peti Kemas/Kontainer .....	7
II.1.1 Perkembangan kontainer.....	7
II.1.2 <i>Reefer container</i> .....	8
a. Cara kerja <i>reefer container</i> .....	9
b. Metode penempatan kontainer.....	10
c. Ukuran <i>reefer container</i> .....	12
II.1.3Peralatan penunjang <i>reefer container</i> .....	13
II.2 Perpindahan panas .....	14
II.2.1 Perpindahan panas secara konduksi.....	15
II.2.2 Perpindahan panas secara konveksi .....	16



II.2.3 Perpindahan panas secara radiasi.....	16
II.2.4 Perhitungan beban pendinginan.....	17
a. Beban produk.....	17
b. Beban infiltrasi .....	18
c. Beban transmisi .....	18
d. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh.....	19
II.3 Sistem refrigerasi daur kompresi uap.....	20
II.3.1 Komponen sistem refrigerasi.....	21
a. Kompresor .....	21
b. Evaporator .....	22
c. Kondensor.....	24
d. Katup ekspansi.....	25
e. Pengereng dan Saringan .....	25
f. Saringan ( <i>filter</i> ).....	27
II.4 <i>Phase Change Material</i> .....	27
II.4.1 Pengenalan <i>phase change material</i> .....	27
II.4.2 Klasifikasi <i>phase change material</i> .....	29
a. Organic .....	30
b. Inorganic.....	31
c. Euthectic .....	32

### **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**

III.1 Identifikasi dan Perumusan Masalah .....	33
III.2 Studi Literatur .....	37
III.3 Pengumpulan Data .....	34
III.4 Studi Empiris .....	34
III.5 Perancangan Sistem Refrigerasi <i>Reefer Container</i> ....	35
III.5.1 Perhitungan Beban Pendinginan Total.....	35
III.5.1.1 Beban Pendinginan Produk .....	35
III.5.1.2 Beban Pendinginan Transmisi.....	35
III.5.1.3 Beban Pendinginan Infiltrasi .....	35
III.5.1.4 Beban Akibat Sumber Panas Lain .....	36
III.5.2 Perhitungan <i>Coefficient of Performance</i> .....	36

III.5.3 Perancangan Komponen Mesin Refrigerasi.....	36
III.5.4 Perancangan <i>Reefer Container</i> .....	36
III.6 Tahap Analisa Data dan Pembahasan .....	37
III.7 Penutup .....	38
III.8 <i>Flow Chart</i> Pengerjaan Tugas Akhir .....	39
III.9 <i>Time Line</i> Pengerjaan Tugas Akhir.....	40

## **BAB IV STUDI EMPIRIS**

IV.1 Konsep sistem refrigerasi hybrid pada <i>reefer truck</i> ....	41
IV.2 Konsep sistem refrigerasi hybrid dengan PCM pada <i>reefer truck</i> .....	42
IV.2.1 Prinsip kerja secara umum.....	42
IV.2.2 Prinsip kerja sistem PCM Eutectic .....	44
IV.2.3 Kelebihan dan kekurangan sistem refrigerasi hybrid dengan PCM .....	45
IV.2.4 Pertimbangan dalam pemilihan PCM.....	45
IV.3 Sistem bongkar muat .....	46
IV.4 Komponen sistem refrigerasi hybrid.....	47
IV.5 Pertimbangan dalam perancangan <i>reefer container</i> .. berbasis teknologi PCM .....	47
IV.5.1 Aspek teknis .....	47
a. Pemilihan komponen penunjang .....	47
b. Desain <i>reefer container</i> .....	48
c. Life time .....	48
IV.5.2 Aspek Ekonomis.....	49
a. Daya kompresor .....	49
b. <i>Capital expenditures</i> .....	49
c. Fuel Saving.....	49
d. <i>Operational cost</i> .....	49
e. Analisa perbandingan .....	49
IV.6 Penelitian sebelumnya .....	49
IV.6.1 Namjoshi et al .....	49
IV.6.2 Rahman et al .....	50
IV.6.3 Yusufoglu et al.....	51

IV.7 Pengoperasian dan perawatan.....	51
IV.7.1 Cara kerja mesin refrigerasi.....	51
IV.7.1.1 Mesin refrigerasi konvensional .....	51
IV.7.1.2 Mesin refrigerasi dengan hybrid PCM.....	52
IV.7.2 Perawatan mesin refrigerasi.....	53
<b>BAB V ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>57</b>
V.1 Spesifikasi kontainer .....	57
V.2 Perhitungan beban pendinginan total .....	58
V.2.1 Beban pendinginan akibat produk.....	59
V.2.2 Beban pendinginan akibat kardus .....	60
V.2.3 Beban pendinginan akibat transmisi .....	61
V.2.3.1 Perhitungan tahanan thermal .....	62
V.2.3.2 Perhitungan koefisien panas menyeluruh.....	70
V.2.4 Beban pendinginan akibat infiltrasi .....	71
V.2.5 Beban pendinginan akibat sumber panas .....	73
V.2.5.1 Beban pendinginan akibat penerangan.....	73
V.2.5.2 Beban pendinginan akibat pekerja .....	74
V.2.5.3 Beban pendinginan akibat motor listrik .....	75
V.3 Perancangan sistem refrigerasi.....	76
V.3.1 Perhitungan COP .....	78
V.3.2 Perancangan Evaporator .....	81
V.3.2.1 Perancangan sirip evaporator .....	84
V.3.2.2 Penurunan tekanan .....	87
V.3.3 Perancangan Kompresor .....	90
V.3.4 Perancangan Kondensor.....	91
V.3.5 Perancangan Katup Ekspansi .....	92
V.4 Estimasi penghematan biaya operasional.....	94
V.4.1 Perhitungan laju aliran massa refrigerant.....	94
V.4.2 Perhitungan daya kompresor.....	95
V.4.3 Perhitungan total kebutuhan massa PCM .....	96
V.4.4 Perhitungan penghematan energi kompresor .....	97
V.5 Analisa ekonomis.....	101
V.6 Pembahasan.....	106
V.6.1 Cara kerja mesin refrigerasi dengan sistem	

hybrid PCM.....	106
V.6.2 Analisa teknis perancangan <i>reefer container</i> .....	108
V.6.2.1 Pemipaan sistem refrigerasi.....	108
V.6.2.2 Komponen penunjang sistem .....	109
V.6.2.3 Bahan insulasi thermal .....	111
V.6.3 Kelebihan dan kelemahan sistem hybrid PCM...	115
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN.....</b>	<b>119</b>
VI.1 Kesimpulan .....	119
VI.2 Saran .....	120
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>122</b>

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## DAFTAR GAMBAR

II.1 Unit pendingin pada <i>reefer container</i> .....	9
II.2 Sirkulasi udara pada <i>reefer container</i> .....	10
II.3 Penempatan kargo dengan sistem <i>block stowage</i> .....	11
II.4 Penempatan kargo dengan tipe <i>palletized stowage</i> .....	11
II.5 Penempatan kargo <i>reefer container</i> .....	12
II.6 Kapasitas pendingin pada <i>reefer container</i> .....	14
II.7 Konsep perpindahan panas .....	17
II.8 Perpindahan kalor menyeluruh.....	19
II.9 Jaringan tahanan thermal.....	19
II.10 Sistem daur kompresi uap .....	20
II.11 Evaporator koil bersirip plat ekspansi langsung.....	23
II.12 Kondensor pendingin udara koil bersirip plat .....	25
II.13 <i>Filter dryer</i> .....	26
II.14 Kurva temperatur <i>phase change material</i> .....	28
II.15 Cara kerja <i>phase change material</i> .....	29
II.16 Klasifikasi <i>phase change material</i> .....	30
II.17 <i>PCM euthectic water salt solution compound</i> .....	32
III.1 <i>Flow chart</i> pengerjaan tugas akhir.....	39
IV.1 Diagram skematik sistem refrigerasi hybrid .....	41
IV.2 Diagram skematik sistem refrigerasi hybrid PCM.....	42
IV.3 Penempatan PCM pada <i>reefer truck</i> .....	43
IV.4 Proses stuffing pada <i>reefer container</i> .....	46
IV.5 Komponen mesin pendingin <i>reefer container</i> .....	47
V.1 Macam macam beban pendinginan .....	58
V.2 Dimensi <i>reefer container</i> .....	61
V.3 Lapisan insulasi dinding <i>container</i> .....	61
V.4 Tahanan thermal pada insulasi dinding <i>container</i> .....	62
V.5 Lapisan insulasi dinding alas <i>container</i> .....	66
V.6 Tahanan thermal pada insulasi dinding alas.....	66
V.7 Laju infiltrasi.....	72

V.8 Nilai pengurangan enthalpy akibat beban udara .....	72
V.9 Grafik perbandingan nilai COP pada kondisi dengan PCM dan tanpa PCM.....	80
V.10 Perencanaan ukuran sirip evaporator .....	84
V.11 Grafik <i>Energy saving</i> (kWh) per hari.....	98
V.12 Grafik <i>Cost saving</i> per hari .....	99
V.13 <i>Cost saving</i> per bulan.....	100
V.14 Grafik <i>Fuel saving</i> per hari .....	101
V.15 Grafik <i>cummulative cash flow</i> dengan sistem hybrid PCM.....	104
V.16 Grafik <i>cummulative cash flow</i> dengan sistem konvensional .....	104
V.17 Diagram blok cara kerja sistem hybrid PCM.....	106
V.18 Perencanaan ukuran module PCM .....	108
V.19 Perencanaan peletakan module PCM pada <i>evaporator tube</i> .....	109
V.20 Perencanaan <i>supporting pipe elements</i> .....	110
V.21 Perencanaan bahan insulasi <i>reefer container</i> .....	112
V.22 Layout <i>reefer container (Long and Cross Section)</i> ...	112
V.23 Layout <i>reefer container (Side and Back View)</i> .....	113

## DAFTAR TABEL

II.1 Detail spesifikasi <i>Reefer Container</i> .....	13
II.2 Konduktivitas thermal bahan.....	16
III.1 Jadwal pelaksanaan tugas akhir .....	40
V.1 Dimensi <i>Reefer Container</i> .....	57
V.2 Karakteristik muatan <i>frozen food</i> .....	59
V.3 Beban pendinginan akibat kardus .....	60
V.4 Setting ketebalan insulasi dinding.....	62
V.5 Setting ketebalan insulasi dinding alas .....	65
V.6 Resume perhitungan tahanan thermal insulasi .....	74
V.7 Resume perhitungan tahanan thermal insulasi sisi alas .....	70
V.8 Resume perhitungan koefisien panas menyeluruh .....	71
V.9 Resume total beban pendinginan .....	75
V.10 Data sistem refrigerasi dengan PCM.....	77
V.11 Data sistem refrigerasi tanpa PCM .....	77
V.12 Resume nilai enthalpy.....	78
V.13 Resume perhitungan COP .....	80
V.14 Data perancangan evaporator.....	81
V.15 Faktor pengotoran normal .....	86
V.16 Resume perhitungan sistem refrigerasi .....	94
V.17 Laju aliran massa refrigerant.....	95
V.18 Kebutuhan daya kompresor isentropis .....	95
V.19 Kebutuhan daya motor penggerak kompresor .....	96
V.20 <i>Saving energy</i> kompresor per hari.....	97
V.21 Penghematan daya kompresor.....	99
V.22 Penghematan kebutuhan BBM per hari .....	100
V.23 Estimasi perhitungan <i>cash flow</i> untuk sistem refrigerasi hybrid PCM.....	102
V.24 Estimasi perhitungan <i>cash flow</i> untuk sistem refrigerasi konvensional .....	103



V.25 Estimasi laba pada perbandingan penggunaan reefer container bagi penyewa.....	105
V.26 Perbandingan sistem refrigerasi konvensional dan sistem hybrid dengan PCM .....	115

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **I.1. Latar Belakang**

Perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi di dunia modern juga memberikan dampak besar terhadap dunia kelautan, seperti halnya di Indonesia. Bagaimana tidak, negara kepulauan terbesar di dunia ini memiliki potensi sumber daya alam yang melimpah dan beraneka ragam yang patut untuk diolah dan dimanfaatkan seiring dengan perkembangan teknologi tersebut. Adanya perkembangan teknologi di bidang kelautan sendiri tidak dapat dipisahkan dari aktivitas manusia di dalamnya. Salah satu contohnya ialah kegiatan perdagangan maupun ekspedisi dan pengiriman barang (*freight forwarding*) melalui angkutan kapal. Kapal menurut UU No 17 Tahun 2008 adalah kendaraan air dengan bentuk dan jenis tertentu, yang digerakkan dengan tenaga angin, tenaga mekanik, energi lainnya, ditarik atau ditunda, termasuk kendaraan yang berdaya dukung dinamis, kendaraan di bawah permukaan air, serta alat apung dan bangunan terapung yang tidak berpindah-pindah. Setiap muatan yang diangkut ke dalam ruang muat kapal patut untuk diperhatikan dan dijaga, karena muatan (*payload*) tersebut merupakan sumber pendapatan utama pada kapal. Sehingga berbagai upaya dilakukan oleh pihak pemilik kapal untuk menjaga kualitas muatan yang diangkut agar tidak rusak selama pelayaran, yaitu dengan menyimpan muatan tersebut didalam sebuah kontainer. Untuk muatan tertentu yang sensitif terhadap perubahan suhu lingkungan seperti daging, buah-buahan atau sayuran segar, *juice*, *ice cream* serta obat - obatan digunakan kontainer berpendingin untuk menjaga kualitas muatan agar tetap baik selama kapal berlayar hingga tiba di

pelabuhan tujuan. Kontainer berpendingin tersebut dirancang khusus dengan bantuan teknologi mesin pendingin di dalamnya. Teknologi sistem pendingin pada umumnya ditujukan untuk mendinginkan suatu lingkungan sampai suhu yang cukup pada segala kondisi cuaca (Ahuja, 2016). Dimana sistem pendingin tersebut biasa dilakukan dengan mengkonsumsi energi listrik dalam jumlah yang besar sehingga mengakibatkan peningkatan pengeluaran pada pemakainya. Di kapal, *reefer container* merupakan contoh produk dari penggunaan sistem pendingin yang memanfaatkan energi listrik sebagai sumber tenaganya. Kontainer berpendingin (*reefer container*) merupakan kontainer pelayaran yang digunakan pada intermoda angkutan barang yang didinginkan untuk menunjang kegiatan transportasi pada muatan barang tertentu yang sensitif terhadap perubahan temperatur lingkungan ([www.gia.org.sg](http://www.gia.org.sg)). Kandungan bahan refrigerant yang tidak ramah lingkungan menjadi masalah tersendiri dari penggunaan *reefer container* konvensional. Selain itu kebutuhan daya yang cukup besar juga mengurangi nilai ekonomis dari penggunaan *reefer container* ini, karena ketika kontainer diangkut masuk ke dalam ruang muat kapal dan kapal sedang berlayar, maka kontainer tersebut harus di *charging* agar tetap dapat mempertahankan temperatur muatan di dalam kontainer. Daya yang dibutuhkan oleh sebuah kontainer berdimensi 40 ft sebesar 6,0 kW untuk menurunkan temperaturnya menjadi  $-18,0^{\circ}\text{C}$  ([www.containerhandbuch.de](http://www.containerhandbuch.de)). Saat ini penggunaan teknologi untuk penyimpanan energi thermal aplikasi sistem refrigerasi yang banyak digunakan adalah *Phase Change Material (PCM)*. Dimana *PCM* mampu menyerap dan melepaskan sejumlah kalor laten berdasarkan perubahan kenaikan maupun penurunan temperatur lingkungan sekitarnya. Keunggulan dari teknologi *PCM* ini adalah mampu menurunkan konsumsi energi dari sebuah mesin pendingin serta lebih ramah lingkungan sehingga mampu menghemat biaya

pemakaian energi ([www.rgees.com](http://www.rgees.com)). Namun saat ini penggunaan teknologi PCM hanya terbatas diaplikasikan pada bidang industri di darat saja, seperti *cold storage*, *household*, *domestic water heater*, *air conditioning*, dll. Untuk penggunaan PCM di bidang *marine*, seperti halnya pada *reefer container* di kapal umumnya jarang digunakan, mengingat kondisi lingkungan laut yang dinamis sehingga dapat menurunkan produktivitas dari kinerja PCM pada suatu obyek ketika ia dioperasikan.

Pada skripsi ini akan dibahas tentang perancangan sistem refrigerasi *reefer container* berbasis teknologi *phase change material* yang diangkut oleh kapal. Pemilihan *reefer container* sendiri sebagai obyek penelitian antara lain karena kegiatan distribusi barang dalam skala besar pada saat ini banyak dilakukan oleh armada kapal. Sehingga kontainer kontainer tersebut sangat diperlukan untuk menjaga kualitas muatan agar tidak rusak selama pelayaran. Sedangkan *reefer container* sendiri diperlukan bagi jenis jenis muatan tertentu yang sensitif terhadap perubahan temperatur lingkungan seperti buah, daging, sayur sayuran, *juice*, *ice cream*, dan lain lain. Metode penelitian yang dipakai pada tugas akhir ini adalah studi perancangan berbasis pada studi literatur dan data data sekunder. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk menghasilkan suatu analisa teknis dari *design* sistem pendingin di *reefer container* di kapal yang menggunakan PCM hybrid yang dikombinasikan dengan unit mesin pendingin konvensional serta mengetahui analisa ekonomis yang didasarkan pada besar estimasi biaya pengurangan beban kerja unit mesin pendingin pada *reefer container* maupun biaya pembelian untuk penambahan komponen mesin pendingin berbasis PCM hybrid. Hasil yang diperoleh nantinya dapat dipergunakan sebagai bahan pertimbangan lebih lanjut bagi industri pelayaran dan angkutan barang maupun *container maker* untuk penggunaan *phase change material* sebagai unit pendingin baru pada *reefer container* di kapal.

## **I.2. Perumusan Masalah**

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana cara kerja sistem pendinginan berbasis *phase change material* untuk *reefer container*.
2. Bagaimana perhitungan desain sistem refrigerasi *reefer container* yang memanfaatkan teknologi *phase change material*.
3. Bagaimana perbandingan antara penggunaan *reefer container* dengan unit mesin pendingin konvensional terhadap *reefer container* dengan teknologi PCM ditinjau dari sisi teknis dan ekonomisnya.

## **I.3. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah :

- Untuk mengetahui cara kerja sistem pendingin dengan *phase change material* untuk *reefer container* yang diaplikasikan pada kapal.
- Untuk mengetahui desain sistem refrigerasi pada kontainer berpendingin yang memanfaatkan teknologi *phase change material*.
- Untuk menganalisa aspek teknis serta melakukan komparasi perancangan sistem pendingin konvensional dengan sistem pendingin yang berbasis teknologi *phase change material*.

#### **I.4. Batasan Masalah**

Agar permasalahan yang dibahas dalam penulisan skripsi ini lebih terfokuskan, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut :

1. Tidak menganalisa bahan kandungan/properties *Phase Change Material* yang digunakan, dengan asumsi jika :
  - PCM yang digunakan berbahan dasar cair/liquid
  - PCM yang digunakan untuk proses *freezing* dengan kisaran temperatur  $0 \sim -30^{\circ}\text{C}$ , dengan komoditas yang diangkut berupa *frozen food*
2. *Basic design* sistem pendingin pada *reefer container* kapal mengacu pada *existing design* yang digunakan untuk perhitungan pendinginan di kontainer darat (*mobile refrigerated container*).
3. Desain *reefer container* terbatas pada desain sistem refrigerasi nya saja, bukan merupakan desain konstruksi atau struktur *reefer container*.
4. Tidak menghitung kekuatan konstruksi dan pemilihan spesifikasi komponen dan material kontainer.

#### **I.5. Manfaat Penelitian**

Manfaat yang dapat diperoleh pada penelitian skripsi ini adalah :

1. Memberikan informasi kepada perusahaan penyedia jasa kontainer (*container maker*) mengenai penggunaan teknologi *phase change material* khususnya pada *reefer container* untuk menunjang kegiatan distribusi muatan;
2. Mengetahui kelebihan dari penggunaan *phase change material* ditinjau dari aspek teknis dan ekonomisnya sebagai komponen penunjang kinerja mesin pendingin *reefer container* dengan sistem hybrid.

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **II.1. Peti Kemas / Kontainer**

##### **II.1.1. Perkembangan Kontainer**

Dengan semakin meningkatnya kebutuhan pemakaian sarana peti kemas/kontainer untuk pengangkutan barang – barang/komoditi/cargo untuk kegiatan ekspor dan import maupun lokal, maka diiringi juga oleh perkembangan jenis dan bentuk peti kemas itu sendiri, atau dengan kata lain kontainer berevolusi sesuai dengan jenis barang yang akan dilayaninya.

##### Klasifikasi Bentuk Peti Kemas/Kontainer

- Bentuk Biasa, yaitu jenis *closed box container with side door*, dimana peti kemas hanya dapat dibuka pada satu sisi pintu, biasanya dipakai untuk barang-barang dengan bentuk palet/box/bentuk yang teratur dan mudah penyusunannya.
- Bentuk *Open Top – Open Side*, yaitu peti kemas yang bisa dibuka pada sisi atas dan sisi lainnya yang bukan merupakan pintu kemas tersebut, biasanya untuk muatan yang *over length* dan *over height*
- Bentuk *Open Side*, yaitu peti kemas yang bisa dibuka pada bagian sisi samping saja selain pintu peti kemas tersebut, biasanya dipakai untuk muatan *over length*.
- Bentuk *Over Top*, yaitu peti kemas yang bisa dibuka pada bagian sisi atas saja selain pintu peti kemas tersebut, biasanya dipakai untuk muatan *over height*.
- *Container with thermal*, yaitu jenis peti kemas yang didalamnya dilengkapi oleh mesin pendingin atau pemanas,



terdiri dari berbagai jenis yaitu *Insulated Container*, *Heated Container*, *Refrigerated Container*.

Peti kemas jenis ini digunakan untuk membawa buah – buahan, obat – obatan, sayur – sayuran dan muatan lain yang sensitif terhadap perubahan suhu dan cuaca.

### **II.1.2. Reefer Container**

*Refrigerated/reefer container* merupakan kontainer pelayaran yang digunakan pada intermoda angkutan barang yang didinginkan untuk menunjang kegiatan transportasi pada muatan barang tertentu yang sensitif terhadap perubahan temperatur lingkungan. Pada umumnya, sebuah *reefer container* memiliki *data logger* tersendiri untuk mencatat dan merekam perubahan temperatur yang terjadi di dalam kontainer. Disamping itu, *reefer container* juga memiliki unit mesin pendingin sendiri yang komponennya telah terpasang jadi satu dengan kontainernya, namun kerja dari unit mesin pendingin tersebut bergantung pada sumberdaya listrik yang ada di kapal maupun di dermaga.

Pada beberapa *reefer container* dilengkapi dengan sistem pendingin dengan media air, yang dapat digunakan jika kontainer disimpan di bawah geladak kapal tanpa lubang ventilasi yang memadai untuk menghilangkan dan membuang panas yang bersumber dari peralatan maupun muatan yang diangkut. Namun pada kenyataannya, penggunaan sistem pendingin dengan media air cukup mahal, sehingga pada kapal kapal *reefer* yang modern lebih mengandalkan pada ventilasi untuk membuang panas dari dalam *cargo holds* sehingga penggunaan sistem pendingin dengan media air ini menjadi lebih berkurang.

a. Cara Kerja *Reefer Container*

Pada prinsipnya *reefer container* atau kontainer berpendingin bekerja untuk menjaga kesegaran produk yang diangkut. Pada saat *reefer container* akan digunakan maka ruangan pendingin dikondisikan dengan mengatur suhunya (*setting temperature*) sesuai dengan persyaratan suhu yang dibutuhkan oleh komoditas yang akan diangkut. Kemudian, komoditas muatan tersebut dipindahkan ke dalam ruang pendingin *reefer container* dalam keadaan persyaratan temperatur yang telah tercapai, selanjutnya *reefer container* ditutup rapat agar kondisi temperatur yang telah diatur sebelumnya tetap terjaga.

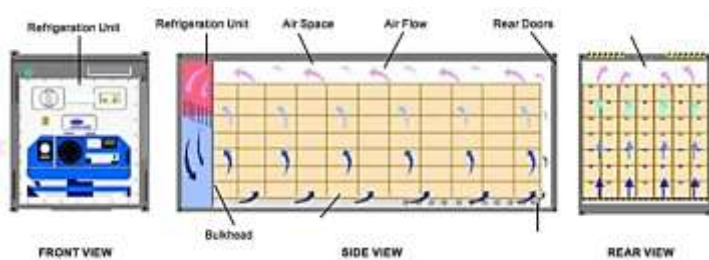


Gambar II.1. Unit Pendingin pada *Reefer Container*

Sumber : Daikin, 2015

Sirkulasi udara di dalam kontainer sangat penting dalam menjaga suhu. Udara dari luar masuk ke dalam kontainer melalui lubang ventilasi. Pada *reefer container* terdapat sensor *flow rate* yang jumlahnya akan tertera pada panel monitor. Jumlah *flow rate* yang masuk dipengaruhi oleh

bukaan ventilasi. Udara masuk didinginkan dengan melalui kumparan evaporator di dalam unit mesin pendingin kontainer tersebut. Udara yang telah dingin kemudian mengalir melalui kisi kisi yang ada di bagian bawah kontainer. Kemudian udara dingin mengalir melalui muatan hingga pada akhirnya sampai pada bagian atas kontainer. Bentuk paling umum dari lantai kontainer adalah T-bar (*T-floor*).



Gambar II.2. Sirkulasi udara pada *reefer container*  
Sumber : Hamburg SUD, 2010

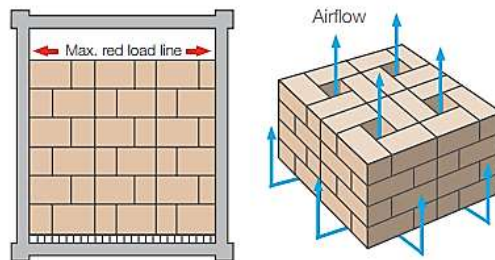
Pada *reefer container*, panas yang ditimbulkan tidak hanya berasal dari luar, tetapi panas yang ditimbulkan dapat berasal juga dari kargo/muatan yang diangkut. Untuk *reefer container* yang mengangkut buah dan sayur tentu dibutuhkan adanya sirkulasi udara. Hal ini dikarenakan untuk muatan seperti buah dan sayuran dapat menghasilkan panas saat respirasi. Panas ini tentu harus dihilangkan karena bisa merusak muatan.

#### b. Metode Penempatan Kontainer

Pada umumnya ada 2 metode penempatan untuk muatan yang mudah membusuk seperti buah dan sayuran, yaitu :

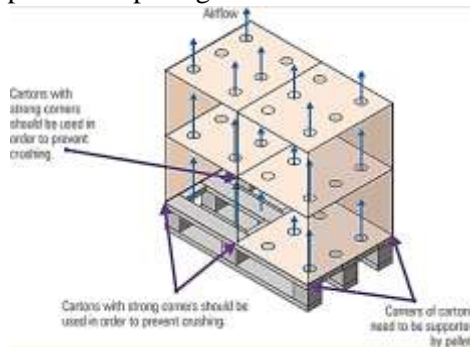
##### 1. *Block Stowage*

## 2. Palletized Cargo Stowed



Gambar II.3. Penempatan kargo dengan sistem *block stowage*  
Sumber : Hamburg SUD, 2010

Tipe *palletized cargo stowage* adalah tipe penempatan kargo dengan menggunakan keranjang atau box pallet. Sudut box harus selaras dengan sudut pallet untuk memastikan keseimbangan berat muatan. Lubang pada pallet ini akan memastikan udara bisa mengalir melalui muatan. Pada umumnya muatan seperti buah dan sayuran memakai tipe *palletized cargo*. Untuk penyusunan muatan pada *palletized cargo* dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar II.4. Penempatan kargo tipe *palletized cargo stowage*  
Sumber : Hamburg SUD, 2010

Bila menggunakan penyimpanan pallet, disarankan agar kargo terakhir dimuat ke dalam *container* harus ditumpuk, untuk mendorong aliran udara melalui kargo dan mencegah udara keluar melalui ruang terbuka di sekitar karton. Apabila muatan tidak sepenuhnya menutup *T-floor* sebaiknya dipasang *filler* atau kayu pada bagian bawah. Skema sirkulasi udara pada *reefer container* dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar II.5. Penempatan kargo pada *reefer container*  
Sumber : Hamburg SUD, 2010

c. *Ukuran Reefer Container*

Dimensi *reefer container* yang umum digunakan pada transportasi muatan adalah sebagai berikut :

Tabel II.1. Detail spesifikasi *Reefer Container*  
(Sumber : Hamburg SUD, 2010)

Equipment Type	Dimension	20' Standard Reefer Container	40' High Cube Reefer Container
Exterior Dimensions	Length (foot)	20'	40'
	Width (foot)	8'	8'
	Height (foot)	8'6"	9'6"
Interior Dimensions	Length (m)	5,470 – 5,555	11,586 – 11,610
	Width (m)	2,290	2,280 – 2,310
	Height (m)	2,266 – 2,324	2,530 – 2,607
Door Opening	Width (mm)	2,296	2,288 – 2,310
	Height (mm)	2,290	2,490 – 2,576
Weights	Gross (kg)	30,480	34,800
	Payload (kg)	27,100 – 27,980	29,900 – 30,540
	Tare (kg)	2,500 – 3,050	4,260 – 4,900
Volume	(cbm)	30,00	67,10 – 68,70

### II.1.3. Peralatan khusus penunjang *reefer container*

Pada kapal pengangkut *reefer container* diperlukan beberapa peralatan khusus untuk menunjang operasional *reefer container* diantaranya :

#### 1. Sebuah sistem pendingin muatan

Pada sistem pendingin kargo biasanya menggunakan sebuah kompresor dengan gas pendingin refrigeran, berupa freon. Freon dingin sebagai refrigeran utama tersebut mendinginkan refrigeran sekunder (*brine* / air garam). Air garam itulah yang bersirkulasi menuju seluruh ruangan muatan dan melalui koil pendingin (evaporator) yang dipasang di bawah fan. Aliran udara dari fan kemudian akan mendinginkan kargo di dalam *reefer container* ;

2. Sistem kontrol yang efektif untuk dapat memenuhi persyaratan temperatur muatan;
3. Kapasitas generator set harus mampu memenuhi kebutuhan daya yang diperlukan oleh peralatan di unit mesin pendingin
4. Peralatan pemantauan khusus (baik secara manual ataupun komputerisasi) untuk memantau muatan dan peralatan secara aman;
5. Sistem kontrol ventilasi yang efektif.  
Tingkat kelembaban udara di dalam ruang kargo perlu dipertahankan.
6. Persyaratan tambahan untuk pompa bilga;  
Setelah proses *loading* muatan, karena penurunan suhu yang cepat maka akan menyebabkan terjadinya kondensasi, dan dapat menyebabkan akumulasi air kondensasi yang berlebih, sehingga perlu dikontrol dengan pompa bilga;
7. Sebuah kapal pengangkut *reefer container* yang modern juga dilengkapi dengan inert gas generator dan sistem penunjangnya. Sehingga proses pendinginan dan kontrol atmosfer dapat diaplikasikan pada muatan secara tepat.

REFRIGERATION CAPACITY									
Zer-OTM system net cooling capacities at 37.8°C (100°C) ambient and 60 Hz electric power:									
Scroll w/R404A:					Reciprocating w/R134a:				
Container Temperature	Cooling Capacity			Power Cons.	Container Temperature	Cooling Capacity			Power Cons.
	Watts	KCal/hr	Btu/hr	KW		Watts	KCal/hr	Btu/hr	KW
21°C (70°F)	13,771	11,844	47,000	10.7	21°C (70°F)	13,507	11,617	46,100	12.0
2°C (35°F)	9,962	8,568	34,000	9.1	2°C (35°F)	11,456	9,853	39,100	10.5
-18°C (0°F)	5,860	5,040	20,000	6.1	-18°C (0°F)	5,604	4,820	19,127	6.0
-29°C (-20°F)	3,809	3,275	13,000	5.3	-29°C (-20°F)	3,023	2,600	10,317	4.5

Gambar II.6. Kapasitas pendingin pada *reefer container*

Sumber : [www.containerhandbuch.de](http://www.containerhandbuch.de)

## II.2. Perpindahan Panas

Perpindahan panas/kalor merupakan proses perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara benda atau material yang dipengaruhi oleh laju perpindahan suatu benda yang terjadi pada kondisi kondisi tertentu.

## II.2.1. Perpindahan Panas Secara Konduksi

Konduksi adalah perpindahan panas yang terjadi karena adanya kontak langsung antar permukaan benda. Jika pada suatu benda terdapat perbedaan suhu, maka akan terjadi perpindahan energi dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah. Hukum Fourier menjelaskan mengenai persamaan untuk menyatakan perpindahan kalor secara konduksi :

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots (1)$$

Dimana :

- q : laju perpindahan kalor (W)  
k : konduktivitas thermal benda (W/m°C)  
A : luas bidang yang tegak lurus dengan arah laju perpindahan kalor (m<sup>2</sup>)  
 $\frac{\partial T}{\partial x}$  : gradient suhu ke arah perpindahan kalor (°C/m)

B

Berdasarkan persamaan diatas menunjukkan bahwa laju perpindahan panas dipengaruhi oleh besarnya konduktifitas thermal dari suatu bahan yang digunakan. Semakin besar konduktifitas thermal bahan maka semakin besar pula laju perpindahan panas yang terjadi.

Tabel II.2. Konduktivitas Thermal Bahan Insulasi Kontainer

No	Jenis Bahan	Konduktifitas Thermal, W/m°C
1	Stainless Steel	16,2
2	Polyurethane	0,04
3	Carbon Steel	50,2
4	Extruded Polystyrene Foam	0,038



5	Plywood	0,12
6	T - Floor	205

### II.2.2. Perpindahan Panas Secara Konveksi

Konveksi adalah proses perpindahan kalor melalui zat penghantar yang disertai dengan perpindahan bagian zat – zat itu. Untuk menyatakan pengaruh konveksi secara menyeluruh maka digunakan hukum Newton tentang pendinginan, dengan persamaan berikut :

$$q = hA (T_s - T_f) \dots\dots\dots (2)$$

Dimana :

q : laju perpindahan kalor (W)

h : koefisien perpindahan panas konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)

A : luas penampang (m<sup>2</sup>)

T<sub>s</sub> : temperatur plat / benda (°C)

T<sub>f</sub> : temperatur fluida yang mengalir dekat permukaan benda (°C)

### II.2.3. Perpindahan Panas Secara Radiasi

Radiasi merupakan perpindahan panas melalui pancaran atau radiasi elektromagnetik tanpa melalui suatu media. Perpindahan panas dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$q = \varepsilon_1 \times \sigma \times A_1 \times (T_1^4 - T_2^4) \dots\dots\dots (3)$$

Dimana :

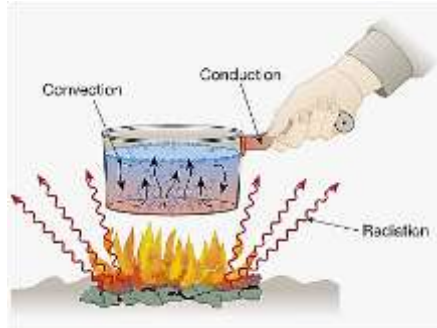
ε : emisivitas, sifat radiasi pada permukaan

A : luas penampang (m<sup>2</sup>)

σ : konstanta *Stefan Boltzman* (5,669 x 10<sup>-8</sup> W/m<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)

T<sub>1</sub><sup>4</sup> : temperatur absolut permukaan (K<sup>4</sup>)

T<sub>2</sub><sup>4</sup> : temperatur lingkungan (K<sup>4</sup>)



Gambar II.7. Konsep Perpindahan Panas  
(Sumber : [www.cma-cgm.com](http://www.cma-cgm.com), 2015)

#### II.2.4. Perhitungan Beban Pendingin

Beban pendingin dapat didefinisikan sebagai suatu beban yang dihasilkan oleh sumber energi panas yang nantinya dapat mempengaruhi kapasitas sistem pendingin. Beban merupakan sumber energi panas yang terdiri dari : beban produk, beban infiltrasi, beban transmisi.

##### a. Beban Produk

Beban produk adalah panas yang dilepaskan oleh produk untuk menjaga temperatur produk agar tetap konstan. Dengan asumsi bahwa massa produk merupakan massa total dari *store box* dalam keadaan penuh. Pada tahap ini terdapat tahap pendinginan. Dimana tahapan pendinginan merupakan tahapan terjadinya penurunan temperatur dari temperatur awal produk ke temperatur pendinginannya. Beban panas sensibel yang dibuang sebesar :

$$Q = m \times C_p \times \Delta T \quad \dots\dots\dots (4)$$

Dimana :

m = Massa produk (kg)

Cp = Panas spesifik diatas titik beku produk (kJ/kg°C)

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur awal dan akhir (°C)

b. Beban Infiltrasi

Masuknya udara luar ke dalam ruangan mempengaruhi suhu udara dan tingkat kelembaban di ruangan tersebut. Pada saat pintu *container* dibuka, maka udara luar akan masuk. Temperatur dan kelembaban udara luar yang tinggi harus diturunkan hingga mencapai kondisi temperatur yang diinginkan tercapai. Jadi beban infiltrasi merupakan beban pendinginan yang perlu diatasi oleh alat pendingin. Besarnya beban infiltrasi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$Q_{if} = m \times (h_o - h_i) \dots\dots\dots (5)$$

Dimana :

$Q_{if}$  = beban panas akibat pertukaran udara (kW)

m = massa udara yang masuk ke dalam ruangan (L/s)

$h_o$  = enthalpy udara luar (kJ/L)

$h_i$  = enthalpy udara dalam (kJ/L)

c. Beban Transmisi

Akibat adanya perbedaan temperatur antara *reefer container* dengan udara luar, maka sejumlah panas akan mengalir. Besarnya panas yang mengalir dipengaruhi oleh beberapa hal seperti letak, bahan material dan udara lingkungan sekitar *reefer container*. Beban transmisi dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = A \times U \times \Delta T \dots\dots\dots (6)$$

Dimana :

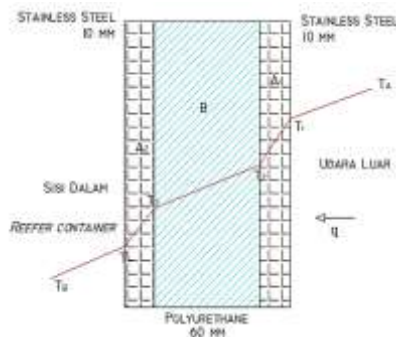
$Q$  = Laju perpindahan panas (W)

$A$  = Luas permukaan ( $m^2$ )

$U$  = Koefisien perpindahan panas total ( $W/m^2K$ )

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur udara luar dan dalam *reefer container* ( $^{\circ}K$ )

d. Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh



Gambar II.8. Perpindahan Kalor Menyeluruh  
(Sumber : dokumentasi pribadi)

Aplikasi sederhana dari perpindahan panas ini dapat dilihat pada gambar diatas. Gambar II.8 tersebut menunjukkan laju aliran panas  $q$  yang bergerak dari fluida A melewati benda A1 menuju fluida B. Proses perpindahan kalor dapat digambarkan dengan jaringan tahanan seperti pada gambar II.9. berikut :

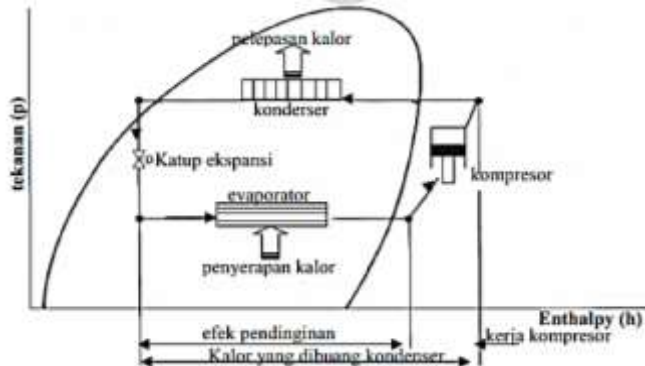


Gambar II.9. Jaringan Tahanan Thermal  
(Sumber : dokumentasi pribadi)

### II.3. Sistem Refrigerasi Daur Kompresi Uap

Dalam proses pendinginan suatu ruangan, dibutuhkan energi yang harus dipindahkan yaitu berupa energi dalam bentuk panas dari ruangan menuju fluida kerja. Proses tersebut dilakukan secara kontinyu sampai temperatur yang diinginkan tercapai. Untuk mencapai proses tersebut dilakukan dengan cara *close cycle* (siklus tertutup), dimana tidak ada fluida yang keluar ke lingkungan.

Siklus pada proses *close cycle* tersebut diawali dengan penyerapan panas pada ruangan oleh bantuan fluida kerja, dalam hal ini refrigerant kemudian energi dalam bentuk panas tersebut di buang ke lingkungan. Pada proses pelepasan kalor ke lingkungan dapat dipermudah dengan cara menaikkan tekanan *refrigerant* dan akan menyebabkan temperatur nya mengalami kenaikan pula. Proses peningkatan tekanan tersebut membutuhkan energi dari kompresor.



Gambar II.10 Sistem Daur Kompresi Uap

Sumber : Modul Sistem Refrigerasi, George E.K

Proses kerja mesin pendingin secara umum sebagai berikut : kompresor melepaskan *refrigerant* berbentuk gas dengan temperatur dan tekanan tinggi karena hasil dari kompresi pada

kompressor saat langkah pengeluaran (*discharge stroke*). *Refrigerant* ini kemudian mengalir ke kondensor. Di kondensor uap *refrigerant* yang bertekanan dan bersuhu tinggi diembunkan. Panas dilepaskan ke lingkungan dan terjadi fase *refrigerant* dari uap ke cair. Dari kondensor dihasilkan *refrigerant* cair bertekanan tinggi dan bersuhu rendah. Tekanan tinggi dari *refrigerant* cair tersebut kemudian diturunkan dengan katup ekspansi sehingga dihasilkan *refrigerant* cair bertekanan dan bertemperatur rendah dalam bentuk kabut yang kemudian dialirkan kembali ke evaporator, *refrigerant* cair mengambil panas dari lingkungan yang akan didinginkan dan menguap sehingga terjadi uap *refrigerant* bertekanan rendah.

### **II.3.1.Komponen sistem refrigerasi**

#### **a. Kompresor**

Kompresor merupakan jantung dari sistem refrigerasi. Pada saat yang sama kompresor menghisap uap refrigeran yang bertekanan rendah dari evaporator dan memampatkannya menjadi uap bertekanan tinggi, sehingga uap akan tersirkulasi. Fungsi utama dari kompresor adalah untuk menaikkan tekanan fluida dalam hal ini refrigeran, yaitu dengan cara memampatkan fluida kerja yang berasal dari evaporator untuk kemudian dialirkan ke kondensor sehingga bersuhu dan tekanan tinggi .

Pertimbangan dalam pemilihan jenis kompresor adalah :

- Konstruksi kompresor lebih sederhana
- Getarannya kurang karena tidak ada bagian yang bergerak bolak balik
- Kapasitas kompresor yang besar

Persamaan daya kompresor pada kondisi *superheated vapor* dapat dirumuskan dengan :

$$W_{\text{comp}} = m_{\text{ref}} \cdot (h_2 - h_1) \dots \dots \dots (7)$$

Dimana :

- W comp           = Daya kompresor (kW)
- m<sub>ref</sub>           = laju aliran massa refirgerant (kg/s)
- h               = enthalpy (kJ/kg)

b. Evaporator

Pada evaporator ini, refrigeran menyerap kalor dari ruangan yang didinginkan. Penyerapan kalor ini menyebabkan refrigeran mendidih dan berubah wujud dari cair menjadi uap (kalor laten).

Untuk perhitungan Q yang masuk ke dalam evaporator (tekanan rendah) atau Q<sub>L</sub>, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q_L = m_{\text{ref}} \cdot (h_1 - h_4) \dots \dots \dots (8)$$

Dimana :

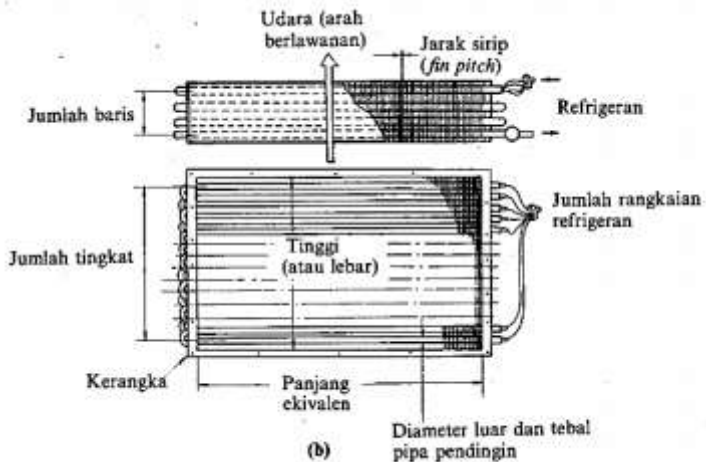
- Q<sub>L</sub>           = Panas yang diserap evaporator (kJ/s)
- m<sub>ref</sub>       = laju aliran massa refirgerant (kg/s)
- h           = enthalpy (kJ/kg)

Dalam siklus refrigerasi, evaporator berperan untuk mendinginkan udara sekitar dengan menyerap kalor yang dihasilkan ruangan oleh fluida refrigeran. Pada perancangan ini evaporator memiliki konstruksi berupa pipa pipa berpendingin yang terdiri dari koil pipa yang pada bagian luarnya bersirip. Koil yang dipakai adalah jenis ekspansi langsung, dimana refrigeran diuapkan secara langsung di dalam pipa pipa evaporator. Karena sebagian dari pipa terisi oleh uap refrigeran, maka perpindahan panas yang terjadi

tidak terlalu besar. Untuk menaikkan koefisien perpindahan panas maka pipa pipa evaporator dilengkapi dengan sirip pada permukaan luarnya, dengan tujuan untuk memperbesar luasan permukaan yang berhubungan dengan udara. Pipa pipa evaporator dan sirip nya terbuat dari bahan tembaga.

Pertimbangan dalam pemilihan material tembaga sebagai pipa evaporator adalah

1. Konstruksinya ringan, kuat, tidak mudah berkarat dan mudah ditekuk
2. Memiliki nilai konduktivitas thermal yang besar sehingga mudah menghantarkan panas dari pipa ke sirip



Gambar II.11. Evaporator koil bersirip pelat jenis ekspansi langsung

(Sumber : Penyegaran Udara, Wiranto, hal. 160)



c. Kondensor

Kondensor merupakan salah satu komponen utama dari sebuah mesin pendingin. Pada kondensor terjadi perubahan wujud refrigeran dari uap *super-heated* (panas lanjut) bertekanan tinggi ke cairan *sub-cooled* (dingin lanjut) bertekanan tinggi. Agar terjadi perubahan wujud refrigeran (pengembunan/*condensing*), maka kalor harus dibuang dari uap refrigeran.

Untuk mendapatkan  $Q$  kondensor (tekanan tinggi),  $Q_H$  dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q_H = m_{ref} \cdot (h_2 - h_3) \dots \dots \dots (9)$$

Dimana :

$Q_H$  =  $Q$  kondensor (kJ/s)

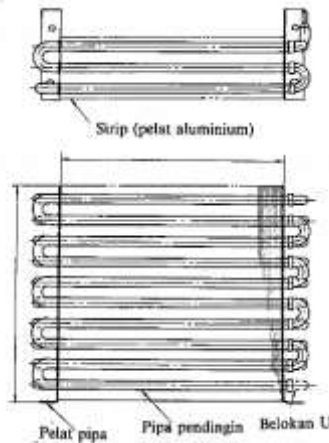
$m_{ref}$  = laju aliran massa refirgerant (kg/s)

$h$  = enthalpy (kJ/kg)

Pada perancangan sistem refrigerasi di *reefer container* ini akan digunakan kondensor berpendingin udara atau *air cooled condensor*.

Ciri ciri kondensor pendinginan udara sebagai berikut :

1. Tidak memerlukan komponen pompa air, pipa air pendingin, penampung air, dan media fluida air
2. Dapat dipasang dimana saja, asal berhubungan dengan udara bebas
3. Tidak mudah terjadi korosi karena permukaan koil yang kering



Gambar II.12. Kondensor pendingin udara koil bersirip pelat  
(Sumber : *Penyegaran Udara*, Wiranto, hal. 153)

d. Katup Ekspansi

Katup ekspansi digunakan untuk mengekspansi cairan refrigeran secara adiabatik dari temperatur dan tekanan tinggi sampai mencapai temperatur dan tekanan rendah. Selain itu, katup ini dapat digunakan juga untuk mengontrol pemasukan refrigeran sesuai beban pendinginan yang harus ditangani oleh evaporator. Katup ekspansi yang digunakan berjenis *thermostatic expansion valve* karena cocok untuk sistem refrigerasi berukuran kecil atau sedang. Beberapa jenis katup ekspansi yang dikenal adalah pipa kapiler, katup ekspansi otomatis, dan katup ekspansi termostatik

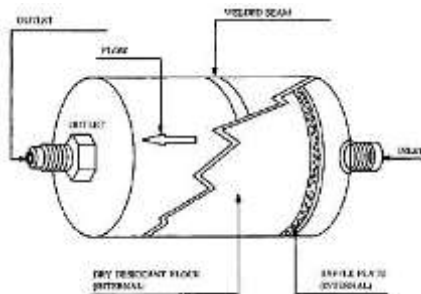
e. Pengering dan Saringan (*Filter Dryer*)

Salah satu komponen pada aplikasi mesin pendingin, baik itu *refrigerator*, *cold storage* maupun *reefer container* yang

dapat menyerap uap air dan kotoran di dalam sistem pendinginan disebut *dryer* / pengering. Di dalam pengering ini berisi bahan pengering dan kawat saringan, yang dapat menyerap uap air, asam dan campuran, endapan minyak pelumas dan menyaring partikel patikel kotoran di dalam sistem. Peletakkan komponen *dryer* / pengering ini pada sisi tekanan tinggi dari sistem, yaitu pada saluran cair/liquid line, di dekat katup ekspansi dan sebaiknya dipasang pada posisi tegak berdiri, dengan lubang masuk pada bagian bawah. Umumnya pengering dipasang permanen dan dilakukan penggantian apabila bahan pengering tidak dapat menyerap lagi.

Beberapa hal yang dapat terjadi apabila tidak dipasang *filter dryer* di dalam sistem refrigerasi

1. Uap air di dalam sistem dapat membeku dan membuat sistem menjadi tersumbat/buntu
2. Air dan asam dapat merusak minyak pelumas kompresor, membenuk endapan yang dapat membuat saringan dan katup ekspansi menjadi buntu.



Gambar 2.13. Filter Dryer  
(Sumber : [www.refrigeratordiagrams.com](http://www.refrigeratordiagrams.com))

Bahan pengisi pengering antara lain :

1. *Silica Gel*

Sering digunakan, berbentuk butiran bulat atau kristal dengan warna putih. Tidak dapat hancur menjadi tepung atau lengket, tidak bereaksi dengan minyak pelumas kompresor. *Silica Gel* setelah menjadi jenuh atau tidak dapat menyerap lagi dapat diaktifkan kembali dengan dipanaskan pada suhu 120-250 °C, dan setelah menjadi dingin dapat dipakai kembali

2. *Molecular Sleeve*

Berbentuk butiran seperti lada putih. Tidak bisa pecah atau lengket dan dapat dipakai secara permanen dan memiliki kemampuan menyerap air sangat kuat. *Molecular Sleeve* setelah menjadi jenuh dapat diaktifkan kembali dengan memanaskan pada suhu 200-300 C

f. Saringan (*Filter*)

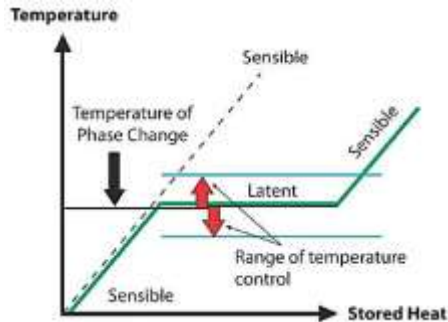
Saringan berguna untuk menyaring bahan pendingin cair sebelum masuk ke katup ekspansi agar kotoran yang ikut terbawa bahan pendingin cair tidak masuk ke dalam katup. Saringan harus mampu menyaring semua kotoran pada sistem, namun tidak boleh menyebabkan penurunan tekanan atau membuat sistem buntu.

## **II.4. Phase Change Material**

### **II.4.1. Pengenalan *Phase Change Material***

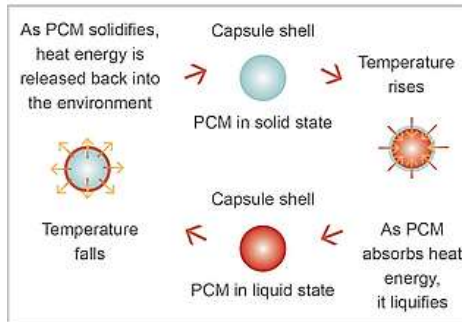
*Phase Change Material* atau material berubah fasa merupakan salah satu jenis penyimpanan energi dalam bentuk panas laten. Sebenarnya penyimpanan energi panas dapat disimpan dalam bentuk panas laten, panas sensibel maupun keduanya. Namun menggunakan *phase change material* ini sebagai penyimpan panas adalah dengan volume material yang relatif kecil dapat

menyimpan panas dalam kapasitas yang besar dengan proses penyerapan dan pelepasan energi panas yang terjadi pada temperatur yang hampir konstan.



Gambar II.14. Kurva Temperature *Phase Change Material*  
(Sumber : <http://www.rgees.com/technology.php>)

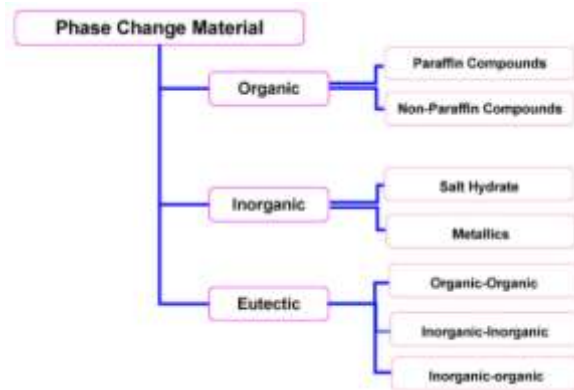
Untuk cara kerja dari *phase change material* sendiri ialah dengan menyerap panas dari ruangan sehingga temperatur PCM akan meningkat. Ketika titik leleh PCM telah tercapai maka fasa nya akan berubah menjadi cair (kalor sensibel), kemudian dilanjutkan proses penyerapan panas oleh PCM yang cukup besar tanpa ada kenaikan temperatur (kalor laten). Kemudian temperatur akan bernilai konstan hingga proses pelelehan berakhir. Ketika temperatur lingkungan sekitar menurun, maka fasa PCM akan berubah menjadi padatan/*solid*, pada kondisi ini PCM melepaskan panas. Penyimpanan massa jenis PCM sama dengan 5 – 14 kali penyimpanan massa jenis sensibel pada volume yang sama.



Gambar II.15. Cara Kerja *Phase Change Material*  
(Sumber : [www.cma-cgm.com](http://www.cma-cgm.com), 2015)

#### II.4.2. Klasifikasi *Phase Change Material*

*Phase Change Energy Storage* merupakan bentuk dari penyimpanan kalor laten. Prinsip utama dari *Latent Heat Storage* adalah ketika panas mengenai sebuah material maka panas tersebut dapat mengubah fase material yang semula padat menjadi cair dengan cara menyimpan kalor laten. Sistem penyimpanan kalor laten ini harus memiliki tiga komponen antara lain material PCMs yang cocok untuk temperatur desain, sistem penahan yang baik untuk bahan menyimpan, fluida yang efektif untuk membawa panas dari sumber panas menuju tempat penyimpanan. *Phase Change Material* secara garis besar terbagi atas 3 kategori, yaitu : *Organic*, *Inorganic*, *Euthectic*. Klasifikasi dari *phase change material* ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar II.16. Klasifikasi *Phase Change Material*  
(Sumber : Lalit M. Bal, 2010)

a. *Organic*

*Phase Change Material Organic* terbagi atas *Paraffin Compounds* dan *Non Paraffin Compounds*. Pemilihan bahan organik yang dapat digunakan sebagai bahan *phase change material* berupa bahan yang memiliki titik leleh rendah. *Phase Change Material* berbahan organik banyak digunakan untuk kategori *food grade level* karena diketahui tidak berbahaya.

1. *Paraffin*

*Paraffin* terdiri dari campuran ikatan alkana yang termasuk dalam hidrokarbon jenuh bersifat non polar. *Paraffin* dihasilkan melalui penggabungan  $\text{CH}_2$  berturut turut. Contoh paraffin yang paling sederhana adalah metana ( $\text{CH}_4$ ) yang merupakan titik awal untuk pertambahan panjang rantai. Titik leleh dari paraffin ini akan bertambah tergantung dari panjang rantai ikatan  $\text{CH}_3$ . Paraffin merupakan bahan yang dikenal aman, murah dan tidak korosif.

## 2. *Non Paraffin*

Material PCM organik Non Paraffin sering disebut juga dengan nama *fatty acids* merupakan PCM dengan jumlah variasi paling banyak. Masing masing material ini memiliki sifat sifat tersendiri, tidak seperti material paraffin yang rata rata memiliki sifat yang hampir sama. Jenis material ini adalah material penyimpanan panas yang paling sering digunakan. Beberapa material organik *non paraffin* ini memiliki sifat seperti :

- Kalor jenis laten yang tinggi
- Titik nyala kecil
- Thermal konduktivitas yang rendah
- Tidak mudah terbakar
- Tidak terlalu berbahaya

## b. *Inorganic*

*Phase Change Material Inorganic* secara umum terbagi dua, yakni *Salt Hydrates* dan *Metallics*.

### 1. *Salt Hydrates* dapat dijadikan bahan sebagai *Phase Change Material*, karena memiliki sifat – sifat sebagai berikut :

- *Salt Hydrates* memiliki kalor laten per unit volume yang tinggi;
- *Salt Hydrates* memiliki konduktivitas thermal yang cukup tinggi;
- Ketika mencair, perubahan volume yang terjadi kecil
- Non – korosif, tingkat racun kecil dan tidak bereaksi dengan plastik

### 2. *Metallics*

Kategori logam yang termasuk dalam *metallics* adalah logam dengan titik leleh yang rendah dan logam *euthetics*. Bahan *metallics* ini jarang dipakai sebagai PCM karena adanya kerugian pada jumlah / berat bahan yang diperlukan. Seperti diketahui jika besarnya energi thermal yang bisa disimpan itu berbanding lurus dengan



volume. Perbedaan dengan PCM lainnya ialah *metallics* memiliki konduktivitas thermal yang baik.

c. *Euthetic*

Sebuah *PCM Euthetic* adalah komposisi lelehan minimum dari dua atau lebih komponen yang masing masing mencair dan membeku dan membentuk komponen kristal selama proses kristalisasi terjadi.

Material	Melting temperature (°C)	Melting enthalpy (kJ/kg)	Thermal conductivity (W/m·K)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Al(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (30.5 wt.%) / H <sub>2</sub> O	-30.6	131	-	1283 (liquid) 1251 (solid)
NaCl (22.4 wt.%) / H <sub>2</sub> O	-21.2	222	-	1165 (liquid) 1108 (solid)
KCl (19.5 wt.%) / H <sub>2</sub> O	-10.7	283	-	1126 (liquid) 1105 (solid)
H <sub>2</sub> O	0	333	0.6 (liquid, 20 °C) 2.2 (solid)	998 (liquid, 20°C) 917 (solid, 0 °C)

Gambar II.17. *PCM Euthectic Water Salt Solution Compound*  
(Sumber : IOSR Journal of Mechanical & Civil Engineering, 2013)

## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

Metodologi penelitian yang digunakan pada pengerjaan Tugas Akhir ini berupa studi perancangan yang berbasis studi literatur serta data pendukung yang diperoleh melalui bahan pustaka maupun kegiatan pengamatan di lapangan. Pada bab ini akan diuraikan tahapan penyusunan laporan sebagai acuan untuk menyelesaikan pekerjaan, dengan maksud agar Tugas Akhir ini dapat mencapai tujuan dan target penyelesaian sesuai waktu yang telah ditentukan. Adapun tahapan yang dilakukan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

#### **III.1. Identifikasi dan Perumusan Masalah**

Pada tahapan paling awal ini, akan dirumuskan permasalahan apa saja yang ingin dibahas dalam penulisan tugas akhir ini. Kajian teknis dan ekonomis mengenai perancangan *reefer container* berbasis teknologi *phase change material* untuk aplikasi di kapal merupakan masalah pokok yang ingin diselesaikan dalam skripsi.

#### **III.2. Studi Literatur**

Pada tahapan kedua ini membahas masalah studi literatur, tujuan dari bab ini untuk mencari referensi dan bahan pustaka yang terkait dengan tema atau topik yang menunjang pembahasan dalam skripsi ini, yaitu mengenai *refrigerated container*, *phase change material*, perancangan sistem refrigerasi, perpindahan panas. Literatur yang ditinjau bersumber dari media seperti :

- Buku / Modul / *e-book* / *Handbook*
- Publikasi artikel ilmiah (jurnal, *proceeding*, paper)
- Tugas Akhir, thesis
- Internet, media online

Sedangkan untuk pencarian beberapa bahan pustaka tersebut dilakukan di beberapa tempat, antara lain :

- Perpustakaan ITS
- Ruang Baca FTK
- Laboratorium Mesin Fluida dan Sistem, Jurusan Teknik Sistem Perkapalan FTK ITS

### **III.3. Pengumpulan Data**

Tahap pengumpulan data dilakukan dengan cara melakukan observasi lapangan ke tempat studi kasus yang telah ditentukan maupun melalui data sekunder yang dikumpulkan dari berbagai studi literatur. Data data yang diperlukan untuk menunjang pengerjaan tugas akhir ini antara lain :

- Data ukuran dan spesifikasi *reefer container*
- Data record performance unit mesin pendingin pada *reefer container*
- Data *basic design* perencanaan sistem pendingin di kontainer darat (*mobile refrigerated container*)

### **III.4. Studi Empiris**

Pada tahapan ini, dilakukan studi empiris tentang obyek yang akan diteliti, meliputi :

- Desain sistem refrigerasi menggunakan *hybrid phase change material*
- Studi tentang *existing design* dari sistem refrigerasi *phase change material*, baik melalui penelitian penelitian terdahulu maupun mengacu dari design yang sudah ada, dalam hal ini dipakai desain dan perhitungan pada *mobile reefer container*
- Komponen – komponen apa saja yang dibutuhkan oleh sistem refrigerasi berbasis teknologi *phase change material hybrid* yang sesuai untuk aplikasi di kapal.

### **III.5. Perancangan Sistem Refrigerasi untuk *Reefer Container***

Pada tahapan ini akan dilakukan desain untuk sistem refrigerasi berbasis teknologi *phase change material* untuk *reefer container*. Dalam perancangan ini, tahapan yang dilakukan adalah :

#### **III.5.1. Perhitungan Beban Pendinginan Total**

Perhitungan beban pendinginan merupakan proses pertama yang dilakukan setelah studi empiris. Perhitungan ini dilakukan untuk mendapatkan jumlah beban panas yang diserap oleh sistem untuk menurunkan temperatur produk.

##### *III.5.1.1. Beban Pendinginan Produk*

Pada skripsi ini produk yang diangkut adalah *frozen food* dengan kapasitas kalor spesifik sebesar 3,65 kJ/kg°C, kapasitas muatan total produk yang dapat diangkut pada *reefer container* ukuran 20 feet sebesar 6887,4 kg.

##### *III.5.1.2. Beban Pendinginan Transmisi*

Adanya perbedaan temperatur di dalam dan di luar ruangan mengakibatkan timbulnya beban pendinginan dari bangunan. Dalam perancangan ini, direncanakan suhu di dalam ruang pendingin *reefer container* sebesar -18 °C dan suhu di luar ruangan 27°C

##### *III.5.1.3. Beban Pendinginan Akibat Infiltrasi*

Beban pendinginan ini dihitung sebagai akibat adanya perembesan udara yang terjadi ketika dilakukan buka tutup pintu kontainer saat proses stuffing produk.

#### III.5.1.4. *Beban Pendinginan Akibat Sumber Panas Lain*

Beban pendinginan akibat sumber panas lain ini terdiri dari beban akibat penerangan, beban akibat motor listrik serta beban akibat kalor dari pekerja.

#### III.5.2. **Perhitungan *Coefficient of Performance***

Perhitungan COP yang dilakukan mengacu pada 2 data pengamatan (*record temperature*) dari PT. EST International Tuban, pada 2 kontainer berpendingin dengan ukuran yang sama, namun menggunakan sistem refrigerasi yang berbeda, satu kontainer menggunakan sistem refrigerasi konvensional, dan satu kontainer yang lain menggunakan sistem refrigerasi hybrid PCM. Sehingga untuk membandingkan *performance 2 reefer container* tersebut, secara teoritis dapat dilakukan dengan melakukan perhitungan *coefficient of performance* masing masing kontainer. Nilai COP sendiri dapat dihitung setelah nilai enthalpy pada setiap titik diketahui melalui pembacaan di grafik *p-h chart* sesuai jenis refrigerant yang sama sama digunakan pada kedua *reefer container* tersebut.

#### III.5.3. **Perancangan Komponen Mesin Refrigerasi**

Setelah parameter awal data perancangan mesin refrigerasi diketahui, selanjutnya adalah menghitung kebutuhan untuk perancangan komponen pada sistem refrigerasi hybrid PCM, pada kompresor, evaporator, kondensor, katup ekspansi dan kebutuhan PCM untuk *reefer container* 20 feet.

#### III.5.4. **Desain *Reefer Container***

Sebagaimana yang telah dijelaskan sebelumnya pada perancangan *reefer container* ini digunakan ukuran kontainer standard *marine* sebesar 20 ft.. Persyaratan teknis dalam perancangan kontainer ini mengacu pada standard ASHRAE

2005. Diantaranya, jenis pipa refrigerant dengan material tembaga atau *Copper* ASTM B280, diameter  $\frac{3}{4}$  inchi, dengan jenis refrigerant yang digunakan yaitu R404a. Untuk susunan insulasi pada bagian dinding kontainer sisi samping, kanan, kiri, belakang dan atas berurutan adalah *Stainless Steel – Polyurethane – Stainless Steel*. Sedangkan susunan insulasi pada bagian alas/dasar kontainer berurutan adalah *Carbon Steel – Extruded Polystyrene Foam – Plywood – T-Floor Aluminium*. *Reefer container* ini menggunakan sistem refrigerasi daur kompresi uap yang dikombinasikan dengan sistem refrigerasi *hybrid phase change material*. PCM yang digunakan pada desain kontainer ini berbahan *euthectic*, dengan karakteristik *food grade level, freezing temperature 0 ~ -30°C* dan Heat of Fusion 200,5 kJ/kg (*Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2015) hal. 327*)

### III.6. Tahap Analisa Data dan Pembahasan

Pada tahapan analisa ini akan dilakukan kegiatan sebagai berikut

#### a. Validasi

Melakukan validasi terhadap hasil perancangan yang telah dilakukan sebelumnya dengan mempertimbangkan :

- *Technical requirements*.

Apakah sistem refrigerasi pada *reefer container* berbasis teknologi *phase change material hybrid* yang dirancang sebelumnya sudah memenuhi persyaratan teknis.

- Peraturan dari organisasi yang berwenang / *rules*

Apakah desain dari sistem refrigerasi tersebut telah memenuhi aturan persyaratan dari *rules (ASHRAE)* baik dalam segi keamanan (*safety*), operasional, maupun komponen material yang dipasang,

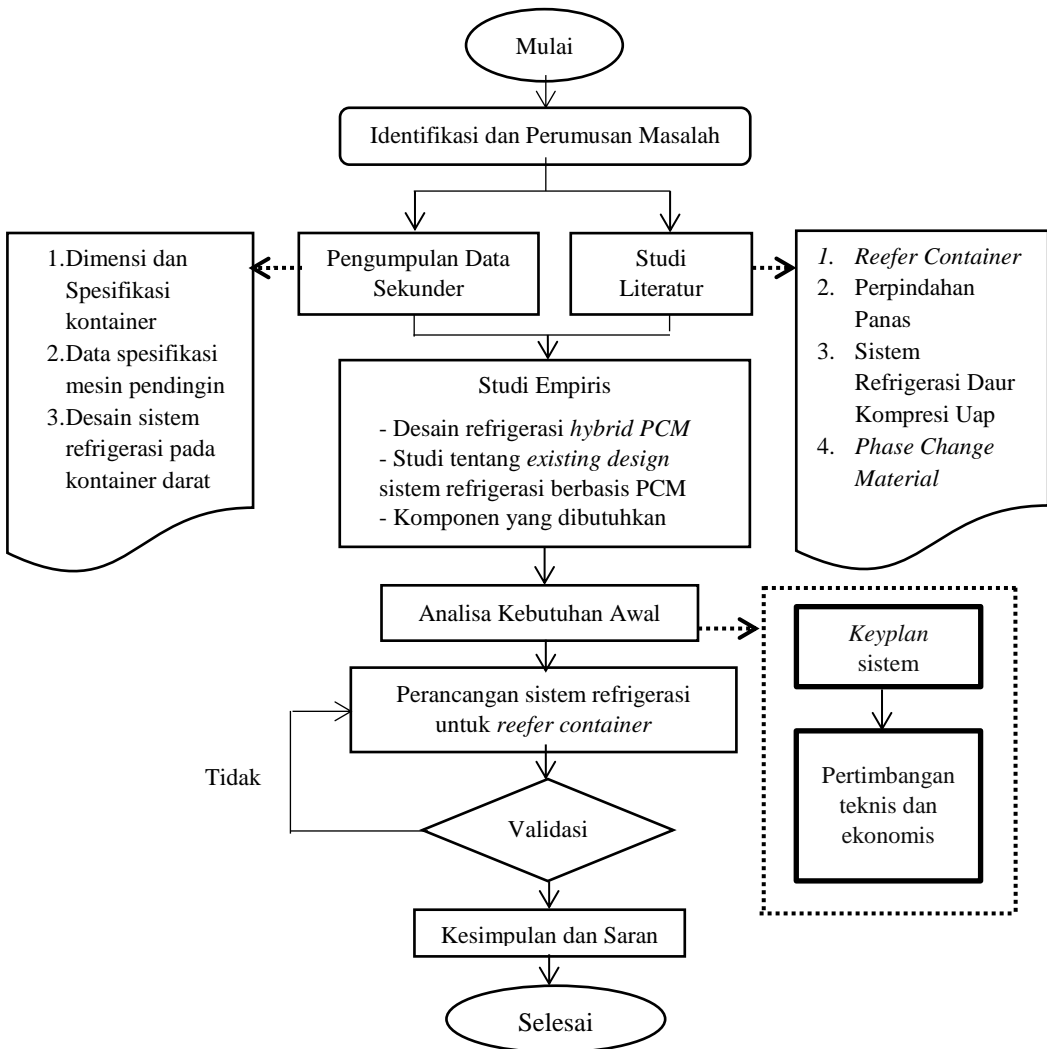
b. Pembahasan

Melakukan pembahasan dari hasil analisa ekonomis yang telah dilakukan dalam bentuk uraian serta tabulasi hasil komparasi antara sistem refrigerasi untuk *reefer container* yang menggunakan unit mesin pendingin konvensional terhadap sistem refrigerasi berbasis teknologi *phase change material*.

### **III.7. Penutup**

Pada bab penutup ini berisi mengenai resume kesimpulan dan saran. Kesimpulan dapat ditarik berdasarkan rumusan permasalahan yang telah direncanakan dengan mengaitkannya dengan analisa yang diperoleh melalui hasil perancangan yang berbasis pada studi literatur dan data data pendukung. Adapun saran dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya agar mendapatkan hasil yang lebih maksimal.

### III.8. Flow Chart Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar III.1. Flow chart pengerjaan tugas akhir



### III.9. Time Line Pengerjaan Tugas Akhir

Tabel III.1. Jadwal pelaksanaan tugas akhir

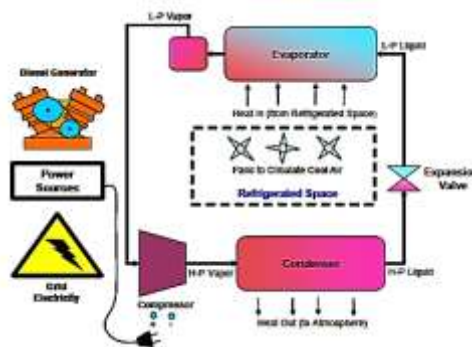
No.	Nama Kegiatan	Target Penyelesaian																								
		Agustus					September					Oktober					November					Desember				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1	Identifikasi dan Perumusan Masalah																									
	1.1 Penentuan judul/topik																									
	1.2 Penentuan rumusan masalah dan tujuan penelitian																									
	1.3 Penulisan laporan Bab I																									
2	Studi Literatur																									
	2.1 <i>Reefer Container</i>																									
	2.2 Perpindahan panas																									
	2.3 Sistem refrigerasi dasar kompresi uap																									
	2.4 <i>Phase change material</i>																									
3	Tahap Pengumpulan Data																									
	3.1 Dimensi dan spec kontainer																									
	3.2 Spec unit mesin pendingin																									
	3.3 Desain sistem refrigerasi kontainer																									
4	Studi Empiris																									
	4.1 Desain sistem refrigerasi <i>hybrid PCM</i>																									
	4.2 Studi tentang <i>existing design</i> sistem refrigerasi berbasis PCM																									
	4.3 Komponen yang dibutuhkan																									
5	Analisa Kebutuhan Awal																									
	5.1 <i>Draft</i> rancangan																									
	5.2 <i>Keyplan</i> sistem																									
	5.3 Pertimbangan awal teknis dan ekonomis																									
6	Desain sistem refrigerasi <i>reefer container</i>																									
	6.1 Perhitungan perpindahan panas																									
	6.2 Kekuatan material pipa refrigerant																									
	6.3 Pemilihan spec komponen mesin pendingin																									
	6.4 Performa mesin pendingin																									
	6.5 Prediksi keandalan mesin																									
7	Tahap Analisa Data dan Pembahasan																									
	7.1 Validasi Data																									
	7.2 Uraian dan tabulasi pembahasan																									
8	Penutup																									
	8.1 Kesimpulan																									
	8.2 Saran																									

## BAB IV

### STUDI EMPIRIS

Studi empiris pada penelitian ini menjelaskan tentang konsep desain untuk memberikan gambaran serta kalkulasi awal dari karakteristik penggunaan sistem pendingin berbasis *phase change material* pada *reefer container*.

#### IV.1. Konsep Sistem Refrigerasi Hybrid Pada Truk Kontainer Berpendingin (*Mobile Reefer Container*)



Gambar IV.1. Diagram Skematik Sistem Refrigerasi Hybrid Pada *Mobile Reefer Truck*  
(Sumber : Olunbumi, 2012)

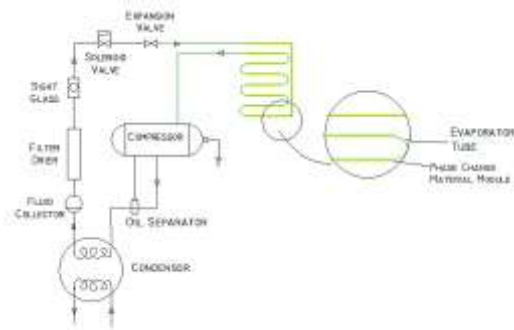
Dewasa ini, penggunaan *hybrid reefer unit* telah banyak dikembangkan. *Hybrid reefer* merupakan sebuah teknologi dimana *reefer* menggunakan dua jenis sumber energi, yakni motor diesel dan motor listrik. Pada saat proses bongkar muat, *reefer container* disambungkan ke *power supply* untuk menggerakkan motor listrik guna menjalankan sistem refrigerasi pada *reefer* agar temperatur di dalam *cold storage* tetap dingin. Pada saat truk kontainer berjalan, motor diesel disambungkan ke

generator untuk menghasilkan energi dalam menjalankan sistem refrigerasi pada *reefer*. Namun, pada sistem ini bahan bakar yang dikonsumsi oleh motor diesel bertambah besar karena harus dibebani dengan generator. Maka dari itu, munculah penggunaan *Phase Change Material* (PCM) untuk mempertahankan temperatur pada *reefer*.

## IV.2. Konsep Sistem Refrigerasi *Hybrid Phase Change Material* Pada Truk Kontainer Berpendingin (*Mobile Reefer Container*)

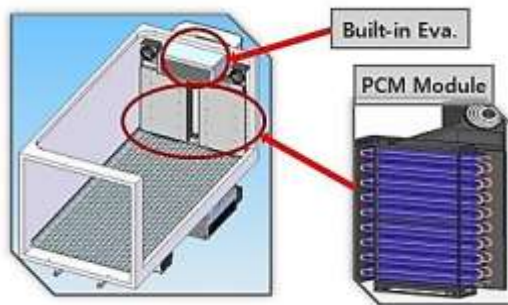
### IV.2.1. Prinsip kerja secara umum

Penggunaan *phase change material* (PCM) pada *reefer truck* sudah mulai banyak dilakukan, yakni dengan sistem refrigerasi hybrid. Pada sistem ini evaporator mendinginkan modul PCM (*charging*) selama rentang waktu tertentu, kemudian setelah *charging* selesai, refrigerator/mesin pendingin dimatikan, sehingga PCM akan bekerja penuh untuk menjaga temperatur di dalam *cold storage*.



Gambar IV.2. Diagram Skematik Sistem Refrigerasi *Phase Change Material* Pada *Reefer Container*  
(Sumber : dokumentasi pribadi)

Sistem refrigerasi ini memanfaatkan PCM untuk menjaga temperatur didalam *container/cold storage*. Mesin refrigerasi hanya dioperasikan untuk charging mendinginkan PCM. Selanjutnya PCM berfungsi menggantikan kerja mesin refrigerasi dalam mempertahankan temperatur. Pada sistem ini PCM akan dilakukan proses pembekuan terlebih dahulu atau disebut *charging* selama 8 – 10 jam non stop, tergantung banyaknya muatan yang dapat diangkut. Nantinya setelah proses *charging* selesai, *supply* listrik akan dimatikan dan kemudian PCM bekerja 100% untuk mempertahankan temperatur muatan di dalam *reefer container*. Kompresor / daya listrik akan kembali menyala untuk proses charging lagi ketika temperatur PCM sudah mulai naik. Sehingga dengan penambahan komponen PCM ini, kebutuhan daya untuk pemakaian energi listrik dapat diturunkan selama rentang waktu tertentu.



Gambar IV.3. Penempatan PCM pada *Reefer Truck*  
(Sumber : PT. EST International website, 2014)

Perbedaan yang paling penting antara PCM dan media penyimpan panas konvensional seperti air atau batuan adalah bahwa titik leleh PCM berada dalam rentang

temperatur kerja. PCM memiliki dua karakteristik utama, yakni densitas penyimpanan panas yang sangat tinggi dan kemampuan menyimpan dan melepaskan panas dalam jumlah yang cukup besar pada temperatur konstan. Hal ini membuat PCM menjadi alternatif yang bagus sebagai media penyimpanan panas untuk berbagai macam aplikasi.

#### **IV.2.2. Prinsip kerja sistem PCM *Euthectic***

Sistem refrigerasi hybrid PCM pada truk kontainer berpendingin umumnya menggunakan sistem *euthectic*. *Phase change material* dengan sistem *euthectic* terdiri dari tabung berongga maupun balok berupa module module yang berisi material PCM *euthectic* untuk menyimpan energi dan menghasilkan efek pendinginan yang diperlukan untuk menjaga suhu di dalam *reefer container* dengan baik. Konsep pendinginan dengan *euthectic* ini berbeda dengan sistem pendingin konvensional, dimana pada sebuah sumber pendinginan (penyerapan panas) dilakukan oleh *phase change material* dengan ekspansi langsung dari gas refrigerant. Material material balok yang mengandung *euthectic* di *charging* (didinginkan / dibekukan) pada malam hari melalui sumber listrik utama. Setelah material balok (*module*) PCM *euthectic* tersebut dibekukan, kemudian ia dioperasikan secara perlahan dan mendinginkan produk dalam durasi waktu tertentu dengan cepat.

Sistem seperti inilah yang sesuai untuk pengiriman makanan dalam skala kecil dimana kehilangan panas (*heat loss*) terjadi hanya melalui frekuensi buka tutup pintu pada *reefer container*. Selain itu, aplikasi penggunaan PCM *Euthectic* ini juga cocok digunakan pada *marine refrigeration*, *ice cream vending*, *medicine*

*storage, fresh produced transport truck refrigeration, chilled good transport dll karena properties pada PCM Euthectic tidak berbahaya untuk produk produk yang dikonsumsi manusia, atau tergolong material food grade level.*

#### **IV.2.3. Keuntungan dan Kelemahan Sistem Refrigerasi dengan *Phase Change Material***

Keuntungan :

1. Mengurangi konsumsi pemakaian daya listrik kompresor,
2. Cocok untuk setiap kondisi iklim,
3. Penanganan apabila terjadi kerusakan yang mudah,
4. Mudah dalam pemasangan instalasi dan perbaikan,
5. *Less noise operation*
6. Mengurangi emisi gas karbon secara signifikan karena pada *reefer truck* dengan instalasi PCM mampu mengurangi konsumsi diesel generator set

Kelemahan :

1. Waktu pemakaian hanya bertahan selama periode waktu tertentu (8 – 12 jam per hari)
2. Penambahan beban panas akan sering terjadi akibat frekuensi buka tutup pintu *cold storage*.

#### **IV.2.4. Pertimbangan Dalam Pemilihan Properties PCM**

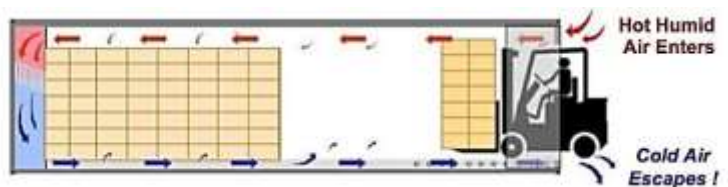
Beberapa pertimbangan yang diperlukan dalam memilih karakteristik PCM yang sesuai untuk digunakan pada system refrigerasi adalah :

- Memiliki panas laten fusi per satuan massa, sehingga jumlah yang lebih rendah dari bahan menyimpan jumlah yang diberikan energi.

- Bahan perubahan fasa harus non beracun, tidak mudah terbakar, tidak korosif, dan non eksplosif,
- Tidak ada kandungan komposisi kimia berbahaya, sehingga life time sistem dan produk muatan yang diangkut tetap terjamin (*food grade level*)

#### 4.3. Sistem Bongkar Muat

Proses pemuatan produk yang akan diangkut kontainer dari *warehouse/store* masuk ke dalam *reefer container* (*loading/stuffing*) awalnya dilakukan dengan mengkondisikan terlebih dahulu temperatur di dalam ruang *reefer container* (*setting temperature*). Ketika temperatur yang di *setting* telah tercapai, kemudian produk mulai dimasukkan ke dalam ruang kontainer/*cold storage* dengan menggunakan bantuan forklift untuk mempercepat proses pemindahan muatan dari *warehouse/store* ke dalam kontainer agar tidak terjadi kenaikan temperatur yang signifikan karena lamanya bukaan pintu kontainer. Selain itu, hal ini bertujuan agar produk/muatan tidak rusak karena kesalahan dalam pemindahan muatan oleh manusia.

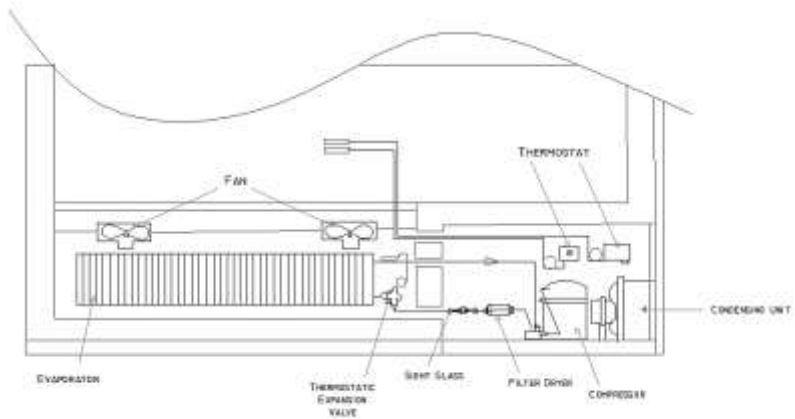


Gambar IV.4. Proses *stuffing* pada *reefer container*  
(Sumber : *Reefer container guide, Hamburg SUD*)

#### IV.4. Komponen Sistem Refrigerasi *Hybrid PCM*

Komponen utama pada sistem refrigerasi hybrid PCM antara lain :

1. *Evaporator*
2. *Compressor*
3. *Condensor*
4. *Expansion Valve*
5. *Module Phase Change Material*



Gambar IV.4. Komponen mesin pendingin *reefer container*  
(Sumber : dokumentasi pribadi)

#### IV.5. Pertimbangan dalam desain *reefer container* berbasis teknologi *phase change material*, antara lain :

##### IV.5.1. Aspek Teknis

- a. Pemilihan komponen tambahan untuk menunjang *phase change material*, sesuai standard ASHRAE 2005



tentang *safety standard refrigeration system*, diantaranya harus mencakup beberapa aspek berikut

- Jenis pipa refrigerant
- *Supporting pipe elements*
- Bahan insulasi
- Standar keselamatan (*safety standard*)

**b. Desain reefer container**

- Penempatan space untuk komponen mesin refrigerasi (kondensor, kompresor, jalur pipa refrigerant/evaporator, fan)
- Bahan insulasi yang digunakan untuk lapisan dinding *reefer container*
- Pemasangan module *phase change material* (*dirrect contact* atau *nondirrect contact*)

**c. Life time**

- Berdasarkan pengamatan di lapangan (PT. EST International, 2016) yang berkaitan dengan performance PCM, umumnya produktivitas PCM akan turun 3% setiap 3 bulan (atau setiap 100 x *cycle charging*)
- Penggantian PCM biasa dilakukan karena ada kebocoran pada modul PCM. Kebocoran biasa terjadi karena goncangan akibat kondisi lingkungan, benturan dengan forklift ketika proses bongkar muat di dalam ruang *reefer container* maupun pembersihan module PCM yang terlalu ekstrem (pembersihan dengan sikat baja).

#### IV.5.2. Aspek Ekonomis

- a. Daya Kompresor  
Perhitungan besarnya daya yang dibutuhkan oleh kompresor pada saat mengkondisikan temperatur *reefer container* pada mesin refrigerasi dengan sistem hybrid PCM dan mesin refrigerasi konvensional.
- b. *Capital Expenditures*  
Estimasi modal awal pembelian komponen dan material yang dibutuhkan guna memodifikasi *reefer container* konvensional menjadi *reefer container* dengan sistem hybrid *phase change material*.
- c. *Fuel saving*  
Perhitungan estimasi penghematan bahan bakar untuk bahan bakar diesel generator set di kapal yang dapat disimpan selama periode waktu tertentu pengoperasian *reefer container* dengan sistem konvensional terhadap sistem hybrid PCM
- d. *Operational Cost*  
Berhubungan dengan biaya untuk operasional kerja mesin refrigerasi.
- e. Analisa Perbandingan  
Mengkomparasi total kebutuhan ekonomis yang ditimbulkan antara penggunaan sistem refrigerasi konvensional dengan sistem refrigerasi *hybrid phase change material*.

#### IV.6. Penelitian Sebelumnya

- IV.6.1. Namjoshi et. all. *Use of Phase Change Material to Improve Performance in Direct Cool Refrigerators*. International Journal of Advanced Engineering and Innovative Technology, 2015

*Phase Change Material* adalah sebuah material yang mampu menyimpan kalor laten. Ketika temperature meningkat, material PCM akan berubah fase dari padat menjadi liquid dikarenakan ikatan di dalam PCM ini lepas. Pada paper ini dilakukan percobaan pada sebuah refrigerator dengan membandingkan kinerja atau COP mesin refrigerasi dengan instalasi PCM dan mesin refrigerasi tanpa instalasi PCM. Selain perbandingan COP, paper ini juga membandingkan daya kompresor dan *cost saving* selama mesin refrigerasi beroperasi. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini adalah mesin refrigerasi dengan instalasi PCM memiliki nilai COP yang sama dengan mesin refrigerasi tanpa instalasi PCM, namun memiliki keunggulan dari segi ekonomisnya.

IV.6.2. Rahman R, et. all. *Performance Improvement of a Domestic Refrigerator Using Phase Change Material (PCM)*.

IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering No. 1 Vol. 3, Tahun 2016.

Paper ini membahas tentang peningkatan kinerja yang disediakan oleh perubahan fasa material yang terkait dengan evaporator di *domestic refrigerator*. Pelepasan panas dan penyimpanan panas pada kulkas tergantung pada karakteristik pendingin dan sifat-sifatnya. Kegunaan dari PCM sebagai *thermal storage* akan membantu untuk meningkatkan COP (*Coefficient of Performance*). Analisa percobaan mencontohkan peningkatan koefisien sistem kinerja menggunakan air sebagai PCM dan untuk beban panas tertentu ditemukan bahwa koefisien kinerja cold storage meningkat 55-60% karena memperpanjang waktu kompresor off dengan menggunakan panas laten dari energi PCM.

IV.6.3. Yusufoglu, et.all *Improving Performance of Household Refrigerators by Incorporating Phase Change Material*. International Journal of Refrigeration 57 (2015)

Upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dari lemari es akan berdampak pada pengurangan konsumsi energi pada rumah tangga. Dalam studi ini, dilakukan pengujian pada empat jenis PCMs yang berbeda dalam dua model kulkas. Dengan mengoptimalkan waktu kompresor on / off sehingga efisiensi energi yang lebih baik dapat dicapai.

Penggunaan sebesar 0,95 kg PCM telah menghasilkan penghematan energi 9,4%

Analisis ekonomi yang dilakukan menunjukkan bahwa menggunakan PCMs di kulkas rumah tangga jelas merupakan biaya metode yang efektif yang menghemat energi dan mengurangi emisi berbahaya.

IV.7. Pengoperasian dan Perawatan

IV.7.1. Cara Kerja Mesin Refrigerasi

IV.7.1.1. Mesin Refrigerasi Konvensional

Pada *reefer container* 20 ft ini cara kerja mesin refrigerasi konvensional nya pada umumnya sama seperti kerja mesin refrigerasi yang lain, sebagai berikut

Di evaporator, refrigeran yang memiliki temperatur lebih rendah mengambil kalor dari lingkungan, yang menyebabkan temperatur refrigeran menjadi naik, dan berubah fase menjadi uap. Uap refrigeran setelah menerima kalor di evaporator kemudian mengalir menuju kompresor. Di dalam kompresor, refrigeran dalam keadaan uap murni karena sudah melewati pemisah cairan-uap refrigeran, lalu refrigeran dikompresi hingga naik temperatur dan tekanan nya karena proses kompresi. Uap refrigeran yang telah dikompresi tersebut mengalir menuju ke

kondensor. Di dalam kondensor uap refrigeran melewati tabung penukar panas, dan mengalami proses pendinginan atau pelepasan kalor ke lingkungan udara luar dengan media pendinginan udara (*air cooled condensor*). Setelah proses pelepasan kalor ke udara luar tersebut, temperatur refrigeran menjad turun karena adanya proses pengembunan. Sehingga fase refrigeran berubah menjadi liquid. Kemudian refrigeran yang telah berubah fase tersebut mengalir menuju katup ekspansi untuk diturunkan tekanannya. Sebelum masuk katup ekspansi, refrigeran melalui *filter dryer* untuk menyaring kotoran kotoran yang ikut terbawa refrigeran. Setelah keluar dari katup ekspansi, temperatur dan tekanan refrigeran menjadi rendah, dan kembali bersirkulasi di evaporator untuk menyerap kalor yang ada di ruangan reefer container dengan bantuan sirkulasi kipas/fan, sehingga temperatur produk dapat terjaga.

#### IV.7.1.2. Mesin Refrigerasi dengan sistem *Hybrid Phase Change Material*

Pada *reefer container 20 feet* yang sedang dibahas dalam tugas akhir ini, selain menggunakan mesin refrigerasi dengan sistem konvensional, juga digunakan sistem hybrid PCM sebagai media penyimpan kalor laten agar temperatur produk di dalam ruang muat *reefer container* tetap terjaga. *PCM* atau *phase change material* yang umum digunakan berbentuk module module yang dipasang menempel pada pipa refrigerant / *evaporator tube*, dengan posisi penempatan module di dinding sisi atas/atap kontainer, penempatan module di atap bertujuan agar tidak terlalu banyak memakan *space* yang berakibat pada berkurangnya *payload*

kontainer. Dan juga agar kemampuan PCM dalam menyerap beban kalor menjadi lebih maksimal. Fungsi PCM pada sistem refrigerasi hybrid ini sendiri hanya untuk mempertahankan temperatur produk pada setting temperatur nya (*stabilizer*), dan bukan untuk membekukan / menurunkan temperatur muatan. Pada awalnya, PCM akan dilakukan proses pembekuan terlebih dahulu (*charging*) selama rentang waktu tertentu, tergantung kapasitas muatan yang diangkut. Setelah proses *charging* selesai dan fasa PCM telah membeku/solid, maka beban kerja kompresor akan menurun/berkurang, karena sistem hybrid PCM mulai bekerja untuk mempertahankan temperatur produk tetap pada setting temperaturnya. Selama 24 jam operasional *reefer container*, kompresor dan PCM bekerja bersama sama untuk mengkondisikan temperatur muatan, sehingga biaya pemakaian energi kompresor dapat menjadi berkurang akibat adanya penambahan komponen sistem hybrid PCM ini.

#### IV.7.2. Perawatan

Peralatan yang digunakan atau dioperasikan tentu membutuhkan suatu perawatan, baik berupa pemeliharaan atau perbaikan pada komponen / bagian peralatan yang rusak tersebut. Tujuan dilakukan perawatan ini adalah untuk memelihara serta memperbaiki suatu peralatan yang tersedia agar tidak terjadi gangguan yang dapat menghambat jalannya operasional peralatan tersebut.

Pada *reefer container* secara umum ada 3 macam perawatan yang dilakukan, yaitu :

1. Perawatan Harian (*Daily Maintenance*)

Perawatan harian merupakan perawatan yang dilakukan sebelum dan sesudah peralatan beroperasi dengan menjaga mesin dan semua komponen penunjangnya agar dapat bekerja dengan baik. Contohnya: pembersihan pipa refrigerant dari bunga es, pengecekan kompresor, dan sensor sensor monitoring.

2. Perawatan Bulanan (*Monthly Maintenance*)

Merupakan perawatan yang dilakukan secara berkala setiap bulannya, dengan tujuan memeriksa bagian bagian mesin dan sistem penunjangnya yang sudah terecord sebelumnya, untuk mengetahui kapan komponen mesin tersebut dapat diganti. Contohnya: penggantian modul modul PCM yang sudah 100x *cycle charging*, pengisian refrigerant.

3. Perawatan Berat

Perawatan yang dilakukan pada periode waktu tertentu setelah komponen mesin diketahui mengalami penurunan kemampuan kerjanya (dibawah standar/batas kemampuan kerja yang dipersyaratkan) sehingga perlu untuk dilakukan penggantian dengan yang baru

Adapun tujuan dari perlunya dilakukan perawatan pada komponen mesin refrigerasi di *reefer container* ini adalah

1. Waktu operasi cold storage menjadi lebih maksimal
2. Daya yang dipakai rendah, sehingga biaya operasional menjadi lebih murah
3. Mesin refrigerasi dapat dioperasikan pada kondisi yang aman

4. Umur/*life time* mesin menjadi lebih awet dan bertahan lama.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan untuk menghindari kerusakan dan gangguan pada mesin refrigerasi *reefer container* di kapal yaitu :

1. Kekuatan

Instalasi sistem refrigerasi yang dipasang pada *reefer container* di kapal hendaknya memiliki kekuatan yang baik saat kondisi perubahan lingkungan terjadi seperti guncangan, mengingat *reefer container* ini nantinya akan diangkut oleh kapal untuk ditransportasikan melalui jalur laut. Pemilihan material yang kuat dan memiliki daya tahan yang baik juga sangat diperlukan.

2. Keamanan

Instalasi sistem refrigerasi yang dipasang harus memiliki tingkat keamanan yang tinggi, misalnya tidak terjadi kebocoran gas refrigerant, kebocoran module module PCM yang akan mencemari lingkungan/produk muatan yang diangkut, maupun bahan kandungan/properties dari refrigerant juga dalam kategori *food grade level*.



*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## BAB V

### ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini data-data yang diperoleh pada tahap pengamatan dan studi literatur akan diolah dan dilakukan analisa dalam rangka mencapai tujuan yang diinginkan yaitu mengetahui kinerja sistem refrigerasi pada *reefer container*.

Adapun analisa pada penelitian ini adalah membahas performareefer container saat kondisi mesin refrigerasi hybrid PCM maupun saat kondisi mesin refrigerasi tanpa PCM, dan perhitungan analisa teknis serta ekonomisterhadap penggunaan sistem hybrid PCM dan sistem refrigerasi konvensional.

#### V.1. Spesifikasi Kontainer

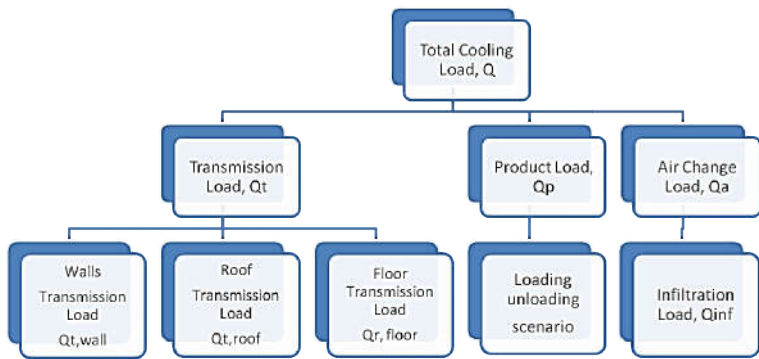
Dimensi ukuran kontainer yang didesain mengacu pada spesifikasi pada tabel dibawah ini :

Tabel V.1. Dimensi *Reefer Container*, Hamburg SUD

Equipment Type	Dimension	20' Standard <i>Reefer Container</i>	40' High Cube <i>Reefer Container</i>
Exterior Dimensions	Length (foot)	20'	40'
	Width (foot)	8'	8'
	Height (foot)	8'6"	9'6"
Interior Dimensions	Length (m)	5,470 – 5,555	11,586 – 11,610
	Width (m)	2,290	2,280 – 2,310
	Height (m)	2,266 – 2,324	2,530 – 2,607
Door Opening	Width (mm)	2,296	2,288 – 2,310
	Height (mm)	2,290	2,490 – 2,576
Weights	Gross (kg)	30,480	34,800
	Payload (kg)	27,100 – 27,980	29,900 – 30,540
	Tare (kg)	2,500 – 3,050	4,260 – 4,900
Volume	(cbm)	30,00	67,10 – 68,70

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan *reefer container* untuk kegiatan transportasi antara lain :

- Kondisi cuaca luar yang ekstrem
- Interior yang diinginkan
- Properties dari bahan insulasi kontainer
- Infiltrasi dan kelembaban udara
- Besarnya biaya konstruksi dan biaya pengoperasian kontainer
- Kekuatan fisik untuk menahan getaran maupun guncangan



Gambar V.1. Macam Macam Beban Pendinginan

## V.2. Perhitungan Beban Pendinginan Total

Dalam perancangan *reefer container* perlu diperhatikan terhadap beban pendinginan yang berpengaruh. Perhitungan beban pendinginan ini diperlukan sebagai bahan pertimbangan pemilihan komponen dan peralatan yang akan dipergunakan. Komponen *cooling load* (beban pendinginan) terdiri dari :

- Perpindahan panas dari bangunan/konstruksi kontainer
- Muatan/produk yang diangkut
- Perembesan/kebocoran udara dari luar dan penyinaran matahari
- Sumber panas lain, yang berasal dari pekerja, lampu, mesin refrigerasi, dll

### V.2.1. Beban Pendinginan Akibat Produk

Merupakan beban panas yang bersumber dari produk/muatan yang diangkut, dalam perhitungan ini berupa *frozen food*. Beban pendinginan yang dihasilkan oleh *frozen food* merupakan salah satu sumber laju perpindahan panas yang cukup signifikan. Adapun karakteristik dari produk sebagai berikut :

Tabel V.2. Karakteristik Muatan *Frozen Food*  
(Sumber : Jurnal Kimia dan Kemasan, April 2015)

Titik beku <i>frozen food</i>	-18° C
Panas spesifik diatas titik beku	3,65 kJ/kg °C
Panas laten	253 kJ/kg
Massa jenis produk	401 kg/m <sup>3</sup>
Massa produk	6883,4 kg

Massa produk dihitung sebesar 70% dari volume total dikali massa jenis produk, dimana volume efektif/payload kontainer dapat ditentukan dengan mempertimbangkan beberapa hal berikut :

1. Penempatan modul modul phase change material pada ruang kontainer/*cold storage*
2. Instalasi pipa refrigerant / evaporator untuk sistem
3. Lashing, untuk mengikat kardus muatan
4. Space untuk penempatan mesin refrigerasi (*compressor, fan, condensor*)

Sehingga volume efektif / payload kontainer :

$m = 70\% \text{ volume} \times \text{massa jenis produk}$

$m = 70\% \times [5,55 \times 2,29 \times 2,249] \times 401 \text{ kg/m}^3$

$m = 6883,4 \text{ kg}$

Beban pendinginan produk

$q = m \times C_{p1} \times (T_2 - T_1)$

$$q = 6883,4 \times 3,65 \times (-2,2 - (-18))$$

$$q = 396609,84 \text{ kJ}$$

Waktu yang dibutuhkan untuk pendinginan produk selama 11 jam = 39600 s

$$\text{Sehingga } q_p = \frac{396610 \text{ kJ/kg}}{39600 \text{ s}}$$

$$q_p = 10,015 \text{ kW}$$

### V.2.2. Beban Pendinginan Akibat Kardus Pembungkus

Selain berisi produk *frozen food*, di dalam ruangan *reefer container* juga berisi muatan lainnya. Dimana masing masing muatan tersebut menimbulkan beban pendinginan. Pada *frozen food* ini direncanakan dibungkus dengan kotak kardus agar tidak rusak, dengan karakteristik kotak kardus sebagai berikut :

Tabel V.3. Beban Pendinginan Akibat Kardus

Berat 1 kardus kosong	0,3 kg
Total berat produk	6877,2 kg
Berat isi produk tiap kardus	10 kg
Jumlah kotak kardus	$6883,4 : 10 = 688$ kotak
Total berat kotak kardus	$0,3 \text{ kg} \times 688 = 200,1 \text{ kg}$
Kalor spesifik kardus	$0,32 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$
Temperatur kardus masuk ruang	$-2,2 \text{ } ^\circ\text{C}$
Temperatur <i>reefer container</i>	$-18 \text{ } ^\circ\text{C}$

Dari data diatas, dapat dihitung beban pendinginan dari kardus sebesar :

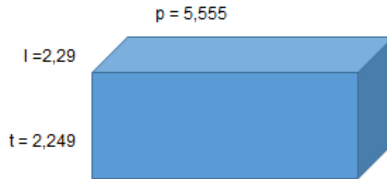
$$q_k = \frac{m \times C_p \times (T_2 - T_1)}{\text{waktu pendinginan}}$$

$$q_k = \frac{200,1 \text{ kg} \times 0,32 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \times (-2,2 - (-18))}{11 \text{ jam}} ^\circ\text{C}$$

$$q_k = 91,97 \text{ kJ/jam} = 0,0255 \text{ kJ/s}$$

### V.2.3. Beban Pendingin Akibat Transmisi ( $Q_t$ )

Adanya perbedaan temperatur di dalam dan di luar ruangan mengakibatkan timbulnya beban pendinginan dari konstruksi / bangunan. Dalam perhitungan ini, direncanakan temperatur *reefer container* yaitu  $-18^{\circ}\text{C}$



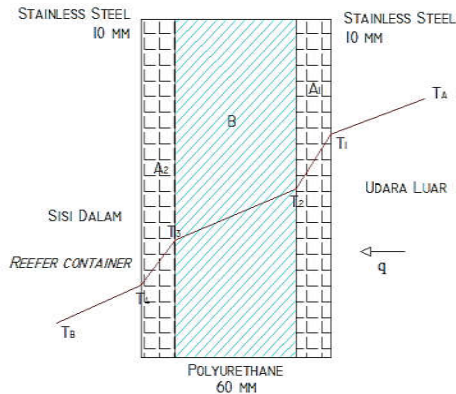
Gambar V.2. Dimensi *Reefer Container*

Perencanaan reefer container untuk kapasitas 20 ft (1 TEU) dengan dimensi berikut :

Panjang = 5,55 m

Lebar = 2,29 m

Tinggi = 2,249 m



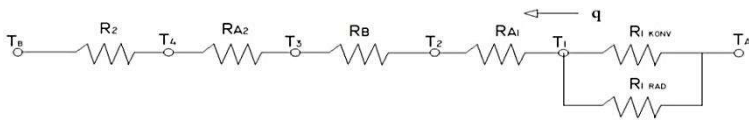
Gambar V.3. Lapisan Insulasi Dinding Kontainer

### Setting ketebalan insulasi

Bahan insulasi yang dipakai secara berurutan pada dinding kontainer adalah sebagai berikut :

Tabel V.4. Setting Ketebalan Insulasi Dinding

Dinding sisi	Tebal Insulasi (mm)			Luas Area (m <sup>2</sup> )
	<i>Stainless Steel</i>	<i>Polyurethane</i>	<i>Stainless Steel</i>	
Samping (ka)	10	60	10	12,482
Samping (ki)	10	60	10	12,482
Depan	10	60	10	5,150
Belakang	10	60	10	5,150
Atap	10	80	10	12,709



Gambar V.4. Tahanan Thermal Pada Insulasi Dinding

#### V.2.3.1. Perhitungan Tahanan Thermal

Untuk mendapatkan nilai koefisien konduktivitas *overall* perlu dihitung terlebih dahulu nilai tahanan tiap material insulasi *reefer container*. Perhitungan tahanan thermal pada insulasi dinding samping kanan *reefer container*

Nilai tahanan di titik  $R_1$  :

- Nilai tahanan akibat konveksi panas dari udara luar ( $R_1$ ). Besar nilai tahanan tersebut adalah :

$$R_1 = 1/h_1 A,$$

dimana :

$h_1$  = koef. perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = luas area (m<sup>2</sup>)

Untuk nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada plat (konveksi bebas) mempunyai nilai 4,5 (W/m<sup>2</sup>°C), sehingga besar nilai tahanan thermal nya :

$$R_{1x} = \frac{1}{4,5 \times 12,49}$$

$$R_{1x} = 0,0178 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

- Nilai tahanan akibat radiasi panas dari udara luar ( $R_1$ ). Besar nilai tahanan tersebut adalah :

$$R_{1y} = \frac{1}{F.A.s.(T_1+T_2).(T_1^2+T_2^2)}$$

dimana :

$h_1$  =emisivitas, sifat radiasi pada permukaan (0,46)

$\sigma$  =konstanta Stefan Boltzman ( $5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

A =luas penampang ( $12,493195 \text{ m}^2$ )

$T_1$  =temperatur absolut permukaan, 473 K

$T_2$  =temperatur lingkungan, 303 K

Sehingga :

$$R_{1y} = \frac{1}{0,46 .12,49 .5,669 \times 10^{-8} (473+303).(473+303^2)}$$

$$R_{1y} = 0,0125 \text{ K/W}$$

- Nilai tahanan total pada titik  $R_1$  =

$$R_1 \text{ tot} = R_{1x} + R_{1y}$$

$$= 0,0303^\circ\text{C/W}$$

Nilai tahanan di titik A1 ( $R_{a1}$ ) :

$$R_{a1} = \frac{\Delta X a}{K a_1 . A}$$

dimana :

$\Delta X$  = tebal material (m) = 0,01

K = konduktivitas thermal (W/m<sup>2</sup>°C) = 16,2



A= luas area (m<sup>2</sup>) =12,49

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,49 m<sup>2</sup>. Dengan nilai konduktivitas *stainless steel* = 16,2 W/m°C dengan ketebalan material 10 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya

$$Ra_1 = \frac{0,01 \text{ m}}{16,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,49 \text{ m}^2}$$

$$Ra_1 = 0,0000494 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Nilai tahanan di titik Rb:

$$Rb = \frac{\Delta Xb}{Kb.A},$$

dimana :  $\Delta X$  = tebal material (m) = 0,06

K = konduktivitas thermal (W/m°C) = 0,04

A = luas area (m<sup>2</sup>) = 12,49

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,49 m<sup>2</sup>. Dengan nilai konduktivitas *polyurethane* = 0,04 W/m°C dengan ketebalan material 60 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya

$$Rb = \frac{0,06 \text{ m}}{0,04 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,49 \text{ m}^2}$$

$$Rb = 1,2\text{E-}01^\circ\text{C/W}$$

Nilai tahanan di titik A2 ( $Ra_2$ ) :

$$Ra_1 = \frac{\Delta Xa}{Ka1.A}$$

dimana :

$\Delta X$  = tebal material (m) = 0,01

K = konduktivitas thermal (W/m°C) = 16,2

A= luas area (m<sup>2</sup>) =12,49

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,49 m<sup>2</sup>. Dengan nilai konduktivitas *stainless steel* = 16,2 W/m°C dengan ketebalan material 10 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya

$$Ra_1 = \frac{0,01 \text{ m}}{16,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,49 \text{ m}^2}$$

$$Ra_1 = 0,0000494 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

*Nilai tahanan di titik R<sub>2</sub> :*

Nilai tahanan akibat konveksi panas dari udara luar (R<sub>1</sub>). Besar nilai tahanan tersebut adalah :

$$R_2 = 1/h_2 \cdot A$$

dimana :

$h_2$  = koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)      A = luas area (m<sup>2</sup>)

Untuk nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada plat (konveksi bebas) mempunyai nilai 75 (W/m°C), sehingga besar nilai tahanan thermal nya :

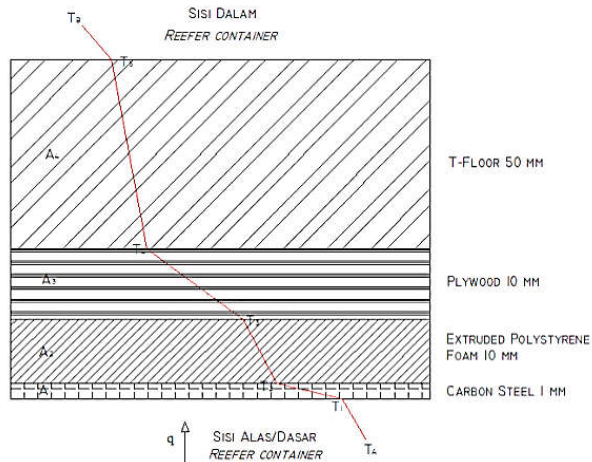
$$R_2 = \frac{1}{75 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,49 \text{ m}^2}$$

$$R_2 = 0,001067^\circ\text{C/W}$$

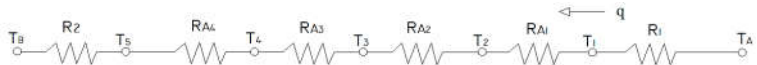
Dikarenakan susunan bahan insulasi dinding kontainer pada sisi samping kanan = sisi samping kiri = sisi atas = sisi depan = sisi belakang, maka metode perhitungan nilai tahanan thermal nya dapat menggunakan rumus yang sama

Tabel V.5. Setting Tebal Insulasi Dinding Alas Kontainer

Dinding sisi	Tebal Insulasi (mm)				Luas Area (m <sup>2</sup> )
	<i>Carbon Steel</i>	<i>Extruded Polystyrene Foam</i>	<i>Plywood</i>	<i>T-Floor Aluminium</i>	
Alas	1	10	10	50	12,70



Gambar V.5. Lapisan Insulasi Dinding Alas *Reefer Container*



Gambar V.6. Tahanan Thermal Pada Insulasi Dinding Alas

Perhitungan tahanan thermal pada insulasi dinding alas/dasar *reefer container* sebagai berikut :

*Nilai tahanan di titik  $R_1$  :*

- Nilai tahanan akibat konveksi panas dari udara luar ( $R_1$ ).

Besar nilai tahanan tersebut adalah :

$$R_1 = 1/h_1 \cdot A$$

dimana :

$h_1$  = koefisien perpindahan kalor konveksi ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )

$A$  = luas area ( $m^2$ )

Untuk nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada plat (konveksi bebas) mempunyai nilai  $4,5$  ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ), sehingga besar nilai tahanan thermal nya :

$$R_1 = \frac{1}{4,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 12,72 m^2}$$

$$R_1 = 0,0175 ^\circ C/W$$

Nilai tahanan di titik A1 ( $R_{a1}$ ) :

$$Ra = \frac{\Delta X a}{Ka \cdot 1 \cdot A}$$

dimana :  $\Delta X$  = tebal material (m) = 0,001

$K$  = konduktivitas thermal ( $W/m \cdot ^\circ C$ ) = 50,2

$A$  = luas area ( $m^2$ ) = 12,72

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar  $12,72 m^2$ . Dengan nilai konduktivitas *carbon steel* =  $50,2 W/m \cdot ^\circ C$  dengan ketebalan material 1 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya :

$$Ra_1 = \frac{0,001 m}{50,2 \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \times 12,72 m^2}$$

$$Ra_1 = 1,56E-06 ^\circ C/W$$

Nilai tahanan di titik A2 ( $R_{a2}$ )

$$Ra_2 = \frac{\Delta X}{Ka_2.A}$$

dimana :  $\Delta X$  =tebal material (m) = 0,01  
 $K$  =konduktivitas thermal (W/m°C) = 0,038  
 $A$  =luas area (m<sup>2</sup>) = 12,72

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,72 m<sup>2</sup>. Dengan nilai konduktivitas *extruded polystyrene foam*= 0,038 W/m°C dan ketebalan material 10 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya :

$$Ra_2 = \frac{0,01 \text{ m}}{0,038 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,72 \text{ m}^2}$$

$$Ra_2 = 2,068 \text{E-}02^\circ\text{C/W}$$

Nilai tahanan di titik A3 ( $Ra_3$ ) :

$$Ra_3 = \frac{\Delta X}{Ka_3.A}$$

dimana :  $\Delta X$  =tebal material (m) = 0,01  
 $K$  =konduktivitas thermal (W/m°C) = 0,12  
 $A$  =luas area (m<sup>2</sup>) = 12,72

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,72 m<sup>2</sup>. Dengan nilai konduktivitas *plywood*= 0,12 W/m°C dengan ketebalan material 10 mm. Sehingga besar nilai tahanan thermalnya :

$$Ra_3 = \frac{0,01 \text{ m}}{0,12 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}} \times 12,72 \text{ m}^2}$$

$$Ra_3 = 6,551 \text{E-}03^\circ\text{C/W}$$

Nilai tahanan di titik A4 ( $Ra_4$ ) :

$$Ra_4 = \frac{\Delta X}{K a_4 \cdot A}$$

dimana :  $\Delta X$  =tebal material (m) = 0,05

$K$  =konduktivitas thermal ( $W/m^{\circ}C$ ) = 205

$A$  =luas area ( $m^2$ ) = 12,72

Pada bagian dinding samping memiliki luas area sebesar 12,72  $m^2$ . Dengan nilai konduktivitas *T-floor aluminium*=205  $W/m^{\circ}C$  dengan ketebalan material 50 mm, Sehingga besar nilai tahanan thermalnya :

$$Ra_4 = \frac{0,05 \text{ m}}{205 \frac{W}{m^{\circ}C} \times 12,72 \text{ m}^2}$$

$$Ra_4 = 1,917E-05^{\circ}C/W$$

*Nilai tahanan di titik R2 :*

Nilai tahanan akibat konveksi panas dari udara luar ( $R_1$ ). Besar nilai tahanan tersebut adalah :

$$R_2 = 1/h_2 \cdot A$$

dimana :

$h_2$  = koefisien perpindahan kalor konveksi ( $W/m^2^{\circ}C$ )

$A$  = luas area ( $m^2$ )

Untuk nilai koefisien perpindahan kalor konveksi pada plat (konveksi bebas) mempunyai nilai 75 ( $W/m^{\circ}C$ ), sehingga besar nilai tahanan thermal nya :

$$R_2 = \frac{1}{7,5 \frac{W}{m^{\circ}C} \times 12,72 \text{ m}^2}$$

$$R_2 = 0,001048^{\circ}C/W$$

Berdasarkan rumus untuk perhitungan tahanan thermal diatas, berikut keseluruhan hasil perhitunganthermal pada setiap bagian dinding *reefer container*

Tabel V.6. Resume Perhitungan Tahanan Thermal Insulasi

<b>Dinding Sisi</b>	<b>R1</b> <b>h = 4,5</b>	<b>Ra1</b> <b>h = 16,2</b>	<b>Rb</b> <b>h = 0,026</b>	<b>Ra2</b> <b>h = 16,2</b>	<b>R2</b> <b>h = 75</b>
Samping (ka)	0,030331	0,0000494	1,20096E-01	0,0000494	0,001067521
Samping (ki)	0,030331	0,0000494	1,20096E-01	0,0000494	0,001067521
Depan	0,043148	0,000119856	0,448077323	0,00011986	0,002588891
Belakang	0,043148	0,000119856	0,448077323	0,00011986	0,002588891
Atap	0,03027	4,85286E-05	0,241896468	4,8529E-05	0,001048218

Tabel V.7. Resume Perhitungan Tahanan Thermal Insulasi Alas

<b>Dinding Sisi</b>	<b>R1</b> <b>h = 4,5</b>	<b>Ra1</b> <b>h = 50,2</b>	<b>Ra2</b> <b>h = 0,038</b>	<b>Ra3</b> <b>h = 0,12</b>	<b>Ra4</b> <b>h = 205</b>	<b>R2</b> <b>h = 75</b>
Lantai	0,0175	1,57E-06	2,07E-02	6,55E-03	1,92E-05	0,0015

#### V.2.3.2. Perhitungan Nilai Koefisien Panas Menyeluruh

Setelah diperoleh nilai tahanan thermal di setiap sisi dinding *reefer container*, selanjutnya nilai koefisien panas menyeluruh (U) dapat dihitung dengan persamaan :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_0} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \dots + \frac{x_n}{k_n} + \frac{1}{h_1}}$$

Sehingga, dengan menggunakan persamaan diatas nilai U pada masing masing dinding dapat dihitung dengan hasil pada tabel berikut :

Tabel V.8. Resume Perhitungan Koefisien Panas Menyeluruh

<b>Dinding Sisi</b>	<b>Nilai U (W/m<sup>2</sup>°C)</b>
Samping (ka)	6,600898754
Samping (ki)	6,600898754
Depan	2,024069782
Belakang	2,024069782
Atap	3,658821562
Lantai	22,35658812
<b>Total</b>	<b>43,26534676</b>

Perhitungan Beban Pendinginan Total Akibat Transmisi/Dinding

Koefisien panas menyeluruh (U) = 43,265 W/m<sup>2</sup>°C

Perbedaan temperatur :

$$\Delta T_{\text{dinding}} = T_2 - T_1$$

$$T_2 = 27^\circ\text{C}$$

$$T_1 = -18^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{dinding}} = 45^\circ\text{C}$$

Sehingga total beban transmisinya adalah :

$$q_{\text{transmisi}} = 43,26 \text{ W/m}^2\text{°C} \times 45^\circ\text{C}$$

$$= 1946,94 \text{ W} = 1,95 \text{ kW}$$

#### **V.2.4. Beban Pendinginan Akibat Buka Tutup Pintu / Infiltrasi**

Volume pergantian udara di dalam ruang pendingin kontainer, salah satunya disebabkan besarnya volume kontainer, dimana

$$\text{Vol} = p \times l \times t$$

$$\text{Vol} = 5,555 \times 2,29 \times 2,249$$

$$\text{Vol} = 28,583 \text{ m}^3$$



Room Volume m <sup>3</sup>	Infiltration Rate (L/s)	
	Room Above 0° C	Rooms Below 0° C
7	3,1	2,3
8,5	3,4	2,6
10	3,7	2,8
15	4,4	3,3
20	5,0	3,8
25	5,5	4,2
30	5,9	4,6
40	6,8	5,4
50	7,5	5,8
75	9,0	6,9
100	10,2	7,9
150	12,2	9,4
200	13,9	10,9
250	15,3	11,9
300	16,7	12,9
400	19,0	14,9
500	21,4	16,8
600	23,6	18,1
700	24,3	18,6
800	25,9	20,4
900	27,1	21,9
1000	28,9	23,1

Gambar V.7. Laju Infiltrasi, *W. F. Stoecker*

TABLE 10-6B Kilojoules per Litre Removed in Cooling Air to Storage Conditions Below 0°C										
Storage Room Temp. °C	Inlet Air Temperature, °C									
	5°		10°		25° Inlet Air RH. %		30°		35°	
	70	80	70	80	50	60	50	60	50	60
0°	0.0092	0.0111	0.0142	0.0154	0.0505	0.0562	0.0650	0.0724	0.0820	0.0921
- 5°	0.0193	0.0210	0.0235	0.0247	0.0592	0.0649	0.0736	0.0809	0.0903	0.1004
- 10°	0.0271	0.0288	0.0309	0.0321	0.0662	0.0719	0.0805	0.0877	0.0970	0.1071
- 15°	0.0350	0.0367	0.0383	0.0395	0.0732	0.0788	0.0873	0.0945	0.1037	0.1137
- 20°	0.0427	0.0444	0.0456	0.0468	0.0801	0.0857	0.0941	0.1013	0.1102	0.1203
- 25°	0.0501	0.0523	0.0525	0.0537	0.0866	0.0922	0.0998	0.1077	0.1165	0.1265
- 30°	0.0571	0.0588	0.0591	0.0604	0.0929	0.0985	0.1067	0.1138	0.1225	0.1325
- 35°	0.0640	0.0657	0.0656	0.0668	0.0989	0.1045	0.1126	0.1197	0.1283	0.1382
- 40°	0.0708	0.0725	0.0720	0.0732	0.1050	0.1106	0.1185	0.1256	0.1341	0.1440

Gambar V.8. Nilai Pengurangan Enthalpy Akibat Beban Udara, *Refrigeration & AC, W. F. Stoecker*

Karena suhu udara di dalam *reefer container* dipertahankan pada -18°C, dengan kelembaban udara sebesar

60%, maka didapatkan nilai perubahan enthalpy melalui hasil interpolasi berdasarkan nilai pada tabel diatas, sebagai berikut

°C	kJ/L
-15	0,0945
-18	x
-20	0,1013

$$x = \frac{-18 - (-15)}{-20 - (-15)} = \frac{x - 0,0945}{0,1013 - 0,0945}$$

$$x = 0,0999 \text{ kJ/L}$$

Sehingga total beban pendinginan akibat infiltrasi sebesar :

$$Q_{if} = 4,6 \text{ L/s} \times 0,0999 \text{ kJ/L}$$

$$Q_{if} = 0,459 \text{ kW}$$

$$Q_{if} = 459,54 \text{ W}$$

#### IV.2.5. Beban Pendinginan Akibat Sumber Panas Lain

##### IV.2.5.1. Beban Pendinginan Akibat Penerangan/Lampu

Beban ini terjadi karena adanya lampu pijar di dalam ruangan yang digunakan ketika penyusunan maupun pembongkaran muatan produk di dalam *reefer container*. Besar beban ini tergantung pada daya lampu, jumlah lampu, jenis lampu, serta lama penyalaan lampu

Besar beban panas akibat penerangan adalah

$$Q_{lp} = n \times (t/24)$$

Dimana :

$Q_{lp}$  = Beban panas akibat penerangan (kW)

$n$  = Daya lampu pijar (kW)

$t$  = Lama penggunaan lampu (jam)

Di dalam *reefer container* direncanakan terdapat 4 lampu pijar 50 W untuk penerangan saat dilakukan bongkar muat produk. Dengan total lama waktu penerangan direncanakan selama 3 jam

$$\begin{aligned} Q_{lp} &= n \times (t/24) \\ &= 4 \times 50 \times (3/24) \\ &= 25W \\ Q_{lp} &= 0,025kW \end{aligned}$$

#### V.2.5.2. Beban Pendinginan Akibat Pekerja

Beban ini terjadi karena adanya pekerja yang bertugas untuk menyusun dan membongkar produk di dalam *reefer container*.

Beban pendinginan akibat pekerja dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q_p = n \times c \times t/24$$

Dimana :

$Q_p$  =Beban panas akibat pekerja (kW)

$n$  =Jumlah pekerja

$c$  =Kalor ekuivalen manusia

$t$  =Jam kerja pekerja

Direncanakan terdapat 3 orang pekerja, dengan beban panas manusia rata rata sebesar 400 BTU/jam = 117,24 W(Febriana, 2015). Dengan lama jam kerja adalah 3 jam

Sehingga :

$$\begin{aligned} Q_p &= n \times c \times t/24 \\ &= 3 \times 117,24 \times 3 /24 \\ &= 43,965 W \\ Q_p &= 0,04396kW \end{aligned}$$

### V.2.5.3. Beban Pendinginan Akibat Motor Listrik

Motor listrik yang digunakan untuk memutar fan evaporator mengeluarkan kalor/panas, yang dapat mempengaruhi proses pendinginan sehingga menjadi beban pendinginan tambahan. Daya motor listrik penggerak fan sebesar 1,5 HP, dengan direncanakan dipasang 2 buah fan Sehingga besar beban pendinginan nya :

$q_m = \text{Faktor beban motor} \times \text{daya motor} \times \text{jumlah motor}$

$q_m = 3700 \text{ (BTU/HP.hour)} \times 1,5 \text{ HP} \times 2$

$q_m = 11000 \text{ BTU/jam}$

$q_m = 3224,1 \text{ W}$

$q_m = 3,2241 \text{ kW}$

Sehingga total beban pendinginan akibat sumber panas lain = 3,29 kW

Tabel V.9. Resume Total Beban Pendinginan

Beban Pendinginan	Besaran (kW)
Produk (Ql)	10,015
Kardus (Qk)	0,0255
Transmisi (Qdt)	1,946
Infiltrasi (Qif)	0,459
Pekerja (Qp)	0,044
Penerangan (Qlp)	0,025
Motor Listrik (Qm)	3,224

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= Q_l + Q_k + Q_{dt} + Q_{lp} + Q_{if} + Q_p \\ &= 15,778 \text{ kW} \end{aligned}$$

Angka keamanan perlu ditambahkan untuk mengantisipasi apabila terjadi beban yang berlebihan agar tidak mengganggu operasi kerja mesin pendingin, dengan nilai asumsi 5% ~ 10%

$$Q_{\text{total}} = 15,778 \text{ kW} + (7\% \times 15,778) \\ = 16,577 \text{ kW}$$

### V.3. Perancangan Sistem Refrigerasi

Sistem daur kompresi uap merupakan sistem yang paling sering dipakai pada sistem refrigerasi, baik kecil maupun besar. Pada sistem ini, digunakan refrigerant sebagai zat yang mengalami proses kondensasi dan evaporasi. Pada daur ini, cairan refrigerant dikompresi dan kemudian diembunkan hingga menjadi cairan kembali, kemudian tekanannya diturunkan agar cairan dapat menguap kembali. Siklus ini merupakan siklus tertutup (*close cycle*), karena zat pendingin mengalir melalui sejumlah komponen unit terpisah seperti kompresor, kondensor, evaporator, dan kembali lagi ke kompresor.

Pada perancangan sistem refrigerasi sendiri diperlukan adanya *superheated* pada refrigerant sebelum mengalir masuk ke kompresor. Diharapkan refrigeran yang masuk ke dalam kompresor benar-benar dalam bentuk uap, sehingga dapat menimbulkan efek refrigerasi. Sedangkan cairan refrigeran yang keluar dari kondensor maupun cairan refrigeran yang masuk ke evaporator dalam keadaan pendinginan lanjut (*subcooling*) yang berpengaruh terhadap meningkatnya efek refrigerasi dan koefisien prestasi. Untuk membuat keadaan panas lanjut dan pendinginan lanjut diperlukan suatu alat penukar kalor (*heat exchanger*) pada suatu sistem refrigerasi yang bertujuan untuk mendinginkan atau menurunkan temperatur cairan refrigeran pada kondensor, guna mencegah terbentuknya gelembung uap yang dapat mengganggu aliran cairan refrigerant yang menuju katup ekspansi.

Pada perancangan sistem refrigerasi pada *reefer container* ini digunakan refrigerant R404A

Properties Refrigerant R404A  
*National Refrigerants, Ltd. 2013*

*Boiling point*@ 1 atm (101,3 kPa) -46,2°C  
*Critical temperature* 92°C  
*Critical pressure* 37,3 bar  
*Critical volume*  $1,94 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$   
*Critical density* 486,5 kg/m<sup>3</sup>  
*Density (liquid at 25°C)* 1044,1 kg/m<sup>3</sup>  
*Density (saturated vapor) at boiling point* 5,48 kg/m<sup>4</sup>

Diketahui :

P1=Compressor suction, bar

P3=Condensor outlet pressure, bar

T1=Compressor suction temperature, °C

T2=Compressor discharge temperature, °C

T4=Condensor outlet temperature, °C

Tabel V.10. Data Sistem Refrigerasi Dengan PCM  
 (Sumber : PT. EST International, 2016)

No.	P1	P3	T1	T2	T3	T4	Time
1	0,61	11,5	31	59	49	23	10.15
2	0,68	12,4	33	63	53	25	10.30
3	0,78	12,8	34	65	58	27	10.45
4	0,98	14	35	68	59	30	11.00
5	1,02	15,5	35	70	57	32	11.15
6	1,02	15,5	35	73	58	33	11.30
7	1,02	15,5	35	75	62	33	11.45
8	1,09	16	34	77	62	32	12.00

Tabel V.11. Data Sistem Refrigerasi Tanpa PCM  
 (Sumber : PT. EST International, 2016)

No.	P1	P3	T1	T2	T3	T4	Time
1	0,4	8,5	27	53	36	17	11.25
2	0,44	9	26	58	37	19	11.40
3	0,47	9,5	27	61	37	18	11.55
4	0,51	10	27	65	39	21	12.10
5	0,34	10,2	26	67	38	19	12.25
6	0,44	10,2	22	72	41	18	12.40
7	0,44	10,2	22	72	39	18	12.55
8	0,57	10,4	20	72	41	19	13.10

Perhitungan *Coefficient of Performance* dibawah ini diperoleh melalui perhitungan enthalpy yang didapatkan pada pembacaan diagram tekanan –enthalpy (p-h chart)

Tabel V.12. Resume Nilai Enthalpy

No.	Nilai Enthalpy (kJ/kg)							
	Dengan PCM				Tanpa PCM			
	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>	h <sub>1</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>3</sub>	h <sub>4</sub>
1	430	451	232	232	420	456	220	220
2	431	452	232	232	422	454	226	226
3	434	456	235	235	425	462	218	218
4	434	456	236	236	427	465	232	232
5	436	458	238	238	420	458	226	226
6	438	460	240	240	420	458	226	226
7	438	460	242	242	427	468	232	232
8	438	460	244	244	426	466	225	225

### V.3.1. Perhitungan *Coefficient of Performance* (COP)

#### Data no. 1

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{430 - 232}{451 - 430} = 9,43$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{420 - 220}{456 - 420} = 5,56$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,43 - 5,56}{5,56} \times 100\% = 69,71 \%$$

#### Data no. 2

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{431 - 232}{452 - 431} = 9,48$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{422 - 226}{456 - 420} = 6,12$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,48 - 6,13}{6,13} \times 100\% = 54,71 \%$$

#### Data no. 3

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} = \frac{434 - 236}{456 - 434} = 9,04$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{425-218}{462-425} = 5,59$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,04-5,59}{5,59} \times 100\% = 61,68 \%$$

#### Data no. 4

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{434-236}{456-434} = 9,00$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{427-232}{465-427} = 5,13$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,00-5,13}{5,13} \times 100\% = 75,38 \%$$

#### Data no. 5

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{436-238}{458-436} = 9,00$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{420-226}{458-420} = 5,11$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,00-5,11}{5,11} \times 100\% = 76,29 \%$$

#### Data no. 6

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{438-240}{460-438} = 9,00$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{420-226}{458-420} = 5,11$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{9,00-5,11}{5,11} \times 100\% = 76,29 \%$$

#### Data no. 7

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{438-242}{460-438} = 8,91$$

$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{427-232}{466-427} = 5,00$$

$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{8,91-5,00}{5,00} \times 100\% = 78,18 \%$$

#### Data no. 8

$$\text{COP}_{\text{dengan PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{438-242}{460-438} = 8,91$$

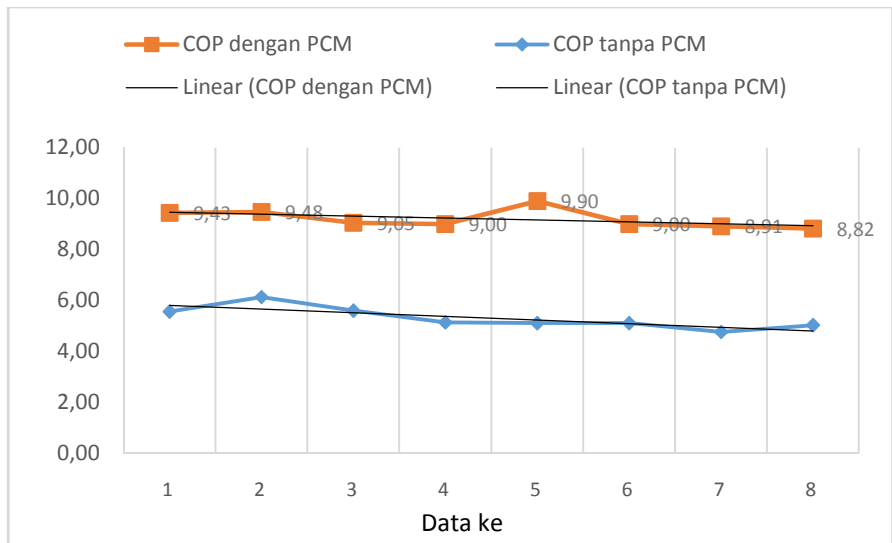
$$\text{COP}_{\text{tanpa PCM}} = \frac{h1-h4}{h2-h1} = \frac{426-225}{466-426} = 5,03$$



$$\% \text{ kenaikan COP} = \frac{8,82-5,03}{5,03} \times 100\% = 75,49 \%$$

Tabel V.13. Resume Perhitungan COP

No.	Nilai COP		
	Dengan PCM	Tanpa PCM	% Kenaikan
1	9,43	5,56	69,714
2	9,48	6,13	54,713
3	9,05	5,59	61,682
4	9,00	5,13	75,385
5	9,00	5,11	76,289
6	9,00	5,11	76,289
7	8,91	5,00	78,182
8	8,82	5,03	75,486



Gambar V.9. Grafik Perbandingan Nilai COP Pada Kondisi Dengan PCM dan Tanpa PCM

### V.3.2. Perancangan Evaporator

Tabel V.14. Data Perancangan Evaporator

Parameter	Besaran	Satuan
Temperatur udara masuk evaporator/container / $T_{U1}$	25	°C
Temperatur udara keluar evaporator/container/ $T_{U2}$	-18	°C
Temperatur refrigeran pada evap	-46,1	°C
Diameter luar pipa evaporator / $d_o$	0,0267	m
Diameter dalam pipa evaporator/ $d_i$	0,0251	m
Tebal pipa tembaga (X)	0,00165	m
Konduktivitas thermal tembaga	385	W/m °C
Jumlah baris pipa ( $N_{bp}$ )	10	
Jumlah pipa tiap baris ( $N_{pb}$ )	20	

Beda temperatur rata rata (LMTD)

(Penyegaran udara, Wiranto hal. 140)

$$LMTD = \frac{(T_{u1} - T_{ref}) - (T_{u2} - T_{ref})}{\ln \left( \frac{T_{u1} - T_{ref}}{T_{u2} - T_{ref}} \right)}$$

$$LMTD = \frac{(25 - (-46,1)) - (-18 - (-46,1))}{\ln \left( \frac{25 - (-46,1)}{-18 - (-46,1)} \right)}$$

$$LMTD = 52,9 \text{ °C}$$

Temperatur udara rata rata ( $T_{avg}$ )

$$T_{average} = T_{ref} + LMTD$$

$$T_{average} = 6,80 \text{ °C}$$

Perpindahan panas yang terjadi pada pipa evaporator

1. Perpindahan panas dari sisi udara (sisi luar evaporator)  
Sifat udara pada temperatur ruang 25 °C = 298 K

(R404a pressure temperature table, Linde Group)

- Viskositas kinematik ( $\nu$ ) =  $13,8 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}^2$
- Viskositas dinamik ( $\mu$ ) =  $1,840 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$
- Angka Prandtl (Pr) = 0,711
- Konduktivitas panas ( $k_f$ ) =  $0,024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
- Densitas ( $\rho$ ) =  $1,3888 \text{ kg/m}^3$
- Kecepatan rata rata udara =  $4 \text{ m/s}$

Angka Reynold udara ( $Re_{ud}$ ) (J.P. Holman, hal. 194)

$$Re_{ud} = \frac{U_m \times d_o}{\nu}$$

$$Re_{ud} = \frac{4 \times 0,0251}{13,88 \times 10^{-6}}$$

$$Re_{ud} = 7694,52$$

Karena  $Re > 2300$  maka alirannya turbulen, sehingga persamaannya untuk Angka Nusselt sebagai berikut :

Angka Nusselt

$$Nu = 0,023 \times Re^{0,8} \times Pr^{0,4}$$

$$Nu = 0,023 \times 7694^{0,8} \times 0,711^{0,4}$$

$$Nu = 25,79$$

Koefisien perpindahan panas di luar pipa

$$h_{ud} = \frac{k \times Nu_{ud}}{d_o} \quad (W.F. Stoecker, Heat Transfer hal.224)$$

$$h_{ud} = \frac{0,0247 \times 25,79}{0,0267}$$

$$h_{ud} = 23,856 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

2. Perpindahan panas dari sisi refrigeran (sisi dalam evaporator)  
Sifat refrigerant pada temperatur  $-46^\circ\text{C}$

- Viskositas dinamik ( $\nu$ ) =  $0,0002 \text{ kg/ms}$
- Konduktivitas panas ( $k_f$ ) =  $0,0905 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

- Kalor spesifik refrigeran pada ( $C_p$ ) = 2,805 kJ/kg°C
- Densitas cairan ( $\rho_f$ ) = 1305,6 kg/m<sup>3</sup>
- Densitas uap ( $\rho_g$ ) = 5,35 kg/m<sup>3</sup>

Massa aliran refrigeran yang mengalir per satuan waktu ( $M_{ref}$ )

$$M_{ref} = \frac{Q_{load}}{\square 1 - \square 4}$$

$$M_{ref} = \frac{16,577}{\square 1 - \square 4}$$

$$M_{ref} = 0,084 \text{ kg/s}$$

Besarnya kecepatan massa refrigeran per satuan luas penampang pipa ( $G_{ref}$ )

$$G_{ref} = \frac{M_{ref}}{N_{bp} \times A_{di}} \quad (J.P. Holman, hal.224)$$

dimana  $A_{di}$  = luas penampang pipa bagian dalam, sehingga :

$$A_{di} = \pi/4 (0,0251)^2$$

$$A_{di} = 0,000493 \text{ m}^2$$

Sehingga :

$$G_{ref} = \frac{0,084}{10 \times 0,000493}$$

$$G_{ref} = 22,120 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Angka Reynold ( $Re_{ref}$ )

$$Re_{ref} = \frac{G_{ref} \times A_{di}}{\mu_{ref}}$$

$$Re_{ref} = \frac{22,12 \times 0,0102}{0,0002}$$

$$Re_{ref} = 2770,53$$

Dari perhitungan diatas, diperoleh nilai  $Re > 2300$  sehingga aliran refrigerant di dalam pipa evaporator turbulen.  
Angka Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{C_p \times \mu}{k} \quad (W.F. Stoecker hal.224)$$

$$Pr = \frac{2,805 \times 0,0002}{0,00905}$$

$$Pr = 21,15$$

Koefisien perpindahan panas konveksi pada bagian dalam pipa

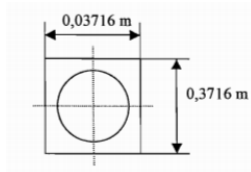
$$h_{ref} = \frac{0,06 \times k_f}{d_i} \times \left(\frac{\rho L}{\mu}\right)^{0,28} \times \left(\frac{d_i \times G_{ref} \times X}{\mu}\right)^{0,87} \times Pr^{0,4}$$

$$h_{ref} = \frac{0,06 \times 0,0905}{0,025} \times \left(\frac{1305}{5,3}\right)^{0,28} \times \left(\frac{0,025 \times 22,1 \times 0,0016}{0,0002}\right)^{0,87} \times 21^{0,4}$$

$$h_{ref} = 12,85$$

### V.3.2.1. Perancangan Sirip Evaporator

Tinggi sirip tembaga (Hs)	=0,01223m	
Lebar sirip (Ls)	=0,03716m	(2 x Hs + do)
Panjang sirip (Ps)	=0,03716m	
Tebal sirip (Ts)	=0,0002m	
Jumlah sirip per meter (i)	=300	
Jarak antar pipa (s)	=0,06395m	(1,25 x (do + 2 Hs))



Gambar V.10. Perencanaan Ukuran Sirip Evaporator

Dari data perancangan diatas, maka dapat dilakukan perhitungan berikut :

1. Luas permukaan sirip per meter panjang pipa ( $A_s$ )

$$A_s = 2 \times I \times (L_s \times P_s) - (1/4 \pi \times d_o^2)$$

$$A_s = 2 \times 300 \times (0,037 \times 0,037) - (\pi/4 \times 0,0267^2)$$

$$A_s = 0,492 \text{ m}^2$$

2. Luas permukaan luar pipa per meter panjang pipa ( $A_p$ )

$$A_p = (\pi \times d_o) - (\pi \times d_o \times T_s \times i)$$

$$A_p = (22/7 \times 0,0127) - (22/7 \times 0,0127 \times 0,0002 \times 300)$$

$$A_p = 0,0375 \text{ m}^2$$

3. Luas permukaan total bagian luar pipa bersirip per meter panjang pipa ( $A_{pt}$ )

$$A_{pt} = A_s + A_p$$

$$A_{pt} = 0,492 + 0,0375$$

$$A_{pt} = 0,5300 \text{ m}^2$$

4. Konstanta :

$$M = \frac{h \text{ ud}}{k_i \times 0,5 \text{ TS}} \quad (W.F. Stoecker Refrigeration \text{ hal. } 241)$$

$$M = \frac{23,86}{385 \times 0,5 \times 0,0002}$$

$$M = 24,893$$

5. Efisiensi Sirip

$$\eta_s = \frac{\tanh M \times H_s}{M \times H_s} \quad (W.F. Stoecker Refrigeration \text{ hal. } 241)$$

$$\eta_s = \frac{\tanh 24,89 \times 0,0122}{24,89 \times 0,0122}$$

$$\eta_s = 0,04017$$

6. Luas penampang pipa bagian dalam ( $A_{pi}$ )

$$A_{pi} = \pi/4 \times d_i^2$$

$$A_{pi} = \pi/4 \times 0,0251^2$$

$$A_{pi} = 0,019m^2$$

7. Luas penampang pipa rata rata ( $A_{pr}$ )

$$A_{pr} = 0,5 \times (A_{pi} + A_t)$$

$$A_{pr} = 0,5 \times (0,019 + 0,5300)$$

$$A_{pr} = 0,344m^2$$

8. Koefisien perpindahan panas menyeluruh per satuan panjang pipa ( $U_o$ )

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_{ud}} + \frac{X_p \times A_{pt}}{kt \times A_{pr}} + \frac{A_{pt}}{h_{ff} \times A_{pi}} + \frac{A_{pt}}{h_{ref} \times A_{pi}}$$

Dimana :

$1/h_{ff}$  = faktor pengotoran pipa bagian dalam karena kotoran maupun endapan

Tabel V.15 Faktor Pengotoran Normal  
Sumber : Penyegaran Udara, Wiranto A, hal 140

Jenis Fluida	R.ft <sup>2</sup> °F/Btu	m <sup>2</sup> . °C/W
Air laut di bawah 125°F	0,0005	0,00009
Air laut di atas 125°F	0,001	0,002
Air umpan ketel yang diolah	0,001	0,0002
Minyak bakar	0,005	0,0009
Minyak celup	0,004	0,0007
Uap alkohol	0,0005	0,00009
Uap tak mengandung minyak	0,0005	0,00009
Udara industri	0,002	0,0004
Zat cair pendingin (refrijeran)	0,001	0,0002

Sehingga :

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{23,8} + \frac{0,00165 \times 0,53}{385 \times 0,344} + \frac{0,53}{0,002 \times 0,08} + \frac{0,53}{12,8 \times 0,08}$$

$$\frac{1}{U_o} = 0,0692$$

$$U_o = 14,45 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

9. Luas permukaan pipa bagian luar total ( $A_{p \text{ tot}}$ )

$$A_{p \text{ tot}} = \frac{Q_{\text{load}}}{U_o \times \text{LMTD}} \quad (W.F. Stoecker, \text{Refrigeration, hal. 250})$$

$$A_{p \text{ tot}} = \frac{16,57}{14,45 \times 52,8}$$

$$A_{p \text{ tot}} = 21,6 \text{ m}^2$$

10. Panjang pipa evaporator ( $Le$ )

$$Le = \frac{A_{p \text{ tot}}}{A_{p \text{ r}}}$$

$$Le = \frac{21,6}{0,344}$$

$$Le = 63,006 \text{ m}$$

### V.3.2.2. Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Pada sistem refrigerasi terjadi penurunan tekanan refrigeran ketika melewati pipa pipa evaporator. Salah satu penyebab terjadinya penurunan tekanan ini karena pipa evaporator yang terlalu panjang. Penurunan tekanan ini berakibat pada kinerja mesin refrigerasi, yaitu daya kompresor yang semakin besar karena kompresor harus mengalirkan/memompa refrigeran dari tekanan yang rendah. Pada perhitungan ini akan dihitung 2 faktor yang berpengaruh terhadap penurunan tekanan, yaitu



1. Penurunan tekanan dilihat dari sisi udara :

Faktor gesekan pada permukaan luar yang diakibatkan oleh udara ( $f_{ud}$ )

$$f_{ud} = \left[ 0,25 + \frac{0,188}{\left( \frac{s-do}{do} \right)^{1,088}} \right] Re_{ud}^{-0,16}$$

(J.P. Holman, hal 276)

$$f_{ud} = \left[ 0,25 + \frac{0,188}{\left( \frac{0,06395-0,0267}{0,0267} \right)^{1,088}} \right] 7694,52^{-0,16}$$

$$f_{ud} = 0,2813$$

Massa aliran udara per satuan waktu

$U_{ud} = V \times \rho_{ud}$  , dengan  $V$  = kecepatan aliran udara = 4 m/s  
maka :

$$U_{ud} = 4 \times 1,388$$

$$U_{ud} = 5,552 \text{ kg/m}^2 \cdot s$$

Penurunan tekanan yang diakibatkan aliran udara ( $\Delta P_{ud}$ )

$$\Delta P_{ud} = \frac{2 \times f_{ud} \times U_{ud}^2 \times N_{bp}}{\rho_{ud}} + \left( \frac{\mu_{utp}}{1,7415 \times 10^{-5}} \right)^{0,14}$$

(J.P. Holman, hal 305)

dengan,

$\mu_{utp}$  = viskositas dinamik udara pada temperatur di dalam pipa

$$\Delta P_{ud} = \frac{2 \times 0,2813 \times 5,552^2 \times 20}{1,388} + \left( \frac{1,840 \times 10^{-5}}{1,7415 \times 10^{-5}} \right)^{0,14}$$

$$\Delta P_{ud} = 250,20 \text{ Pa} = 0,002502 \text{ bar}$$

2. Penurunan tekanan dilihat dari sisi refrigeran :

Faktor gesekan pada permukaan luar yang diakibatkan oleh refrigeran ( $f_{ref}$ )

$$f_{ud} = (1,82 \times \log Re_{ref} - 1,64)^{-2}$$

$$f_{ud} = (1,82 \times \log 2770,5 - 1,64)^{-2}$$

$$f_{ud} = 0,0467$$

Kecepatan massa aliran refrigeran ( $U_{ref}$ )

$$U_{ref} = \frac{V_{ref}}{\rho_1}$$

$$U_{ref} = \frac{22,120 \text{ kg/m}^2\text{s}}{5,352 \text{ kg/m}^3}$$

$$U_{ref} = 4,134 \text{ m/s}$$

Penurunan tekanan di dalam pipa ( $\Delta P_{ref}$ )

$$\Delta P_{ref} = f_{ref} \times \frac{L_e}{d_1} \times \rho_1 \times \frac{U_{ref}^2}{2 \times g_e}$$

$$\Delta P_{ref} = 0,0467 \times \frac{63,006}{0,0251} \times 1305,6 \times \frac{4,13^2}{2 \times 9,81}$$

$$\Delta P_{ref} = 130528,5 \text{ Pa} = 1,31 \text{ bar}$$

*Perancangan Fan / Kipas Udara Evaporator*

- Jumlah fan (n) = 2
- Kalor jenis udara  $T \text{ } 25^\circ\text{C}$  ( $C_p$ ) =  $1,0056 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$
- Density udara pada  $T \text{ } 25^\circ\text{C}$  =  $1,388 \text{ kg/m}^3$
- Beban pendinginan ( $Q_{load}$ ) =  $16,57 \text{ kW}$
- $\Delta T$  udara masuk & keluar evaporator =  $25 - (-18) = 43^\circ\text{C}$

Massa aliran udara per satuan waktu untuk evaporator

$$M_{ud} = \frac{Q_{load}}{C_p \times \Delta T}$$

$$M_{ud} = \frac{16,577 \text{ kJ/s}}{1,0056 \frac{\text{kJ}}{\text{kg } ^\circ\text{C}} \times 43 ^\circ\text{C}}$$

$$M_{ud} = 0,383 \text{ kg/s}$$

Kapasitas udara evaporator ( $Q_{ud}$ )

$$Q_{ud} = \frac{M_{ud}}{\rho_{ud}}$$

$$Q_{ud} = \frac{0,383}{1,388}$$

$$Q_{ud} = 0,28 \text{ m}^3/\text{s}$$

Kapasitas udara yang diperlukan untuk tiap unit evaporator ( $Q_f$ )

$$Q_f = \frac{Q_{ud}}{N_{fan}}$$

$$Q_f = \frac{0,28}{2}$$

$$Q_f = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$$

### V.3.3. Perancangan Kompesor

Data perancangan :

- Beban pendinginan ( $Q_{load}$ ) = 16,57 kW
- Tekanan Isap ( $P_1$ ) = 1,02 bar
- Tekanan Buang ( $P_2$ ) = 15,5 bar

Laju aliran massa refrigeran ( $m_{ref}$ ) :

$$M_{ref} = \frac{\text{Cooling capacity}}{\square 1 - \square 4}$$

$$M_{ref} = \frac{16,577}{438 - 242}$$

$$M_{ref} = 0,0846 \text{ kg/s}$$

Perhitungan daya kompresor (isentropik)

$$P_{comp} = M_{ref} \times (h_2 - h_1)$$

$$P_{comp} = 0,085 \times (h_2 - h_1)$$

$$P_{comp} = 0,084 \times (460 - 438)$$

$$P_{comp} = 1,861 \text{ kW} \sim 2,49 \text{ HP}$$

Perhitungan daya motor penggerak kompresor ( $N'$ )

$$N' = \frac{N}{c \times m} \quad (\text{Penyegaran udara, Wiranto hal. 140})$$

$$N' = \frac{1,861}{0,90 \times 0,75}$$

$$N' = 2,756 \text{ kW} \sim 3,70 \text{ HP}$$

### V.3.4. Perhitungan Kondensor

Jumlah kalor yang dilepaskan kondensor sama dengan jumlah kalor yang diserap oleh refrigeran didalam evaporator dan kalor yang ekuivalen dengan energi yang diperlukan untuk melakukankerja di dalam kompresor

*Kalor pengembunan (kcal/jam)*

$$= Q_{\text{load}} (\text{kcal.jam}) - (P_{\text{comp, kW}} \times 860 \frac{\text{kcal/jam}}{\text{kW}})$$

*(Penyegaran Udara, Wiranto A, hal. 143)*

Dimana :  $Q_{\text{load}} = 16,577 \text{ kW} = 14256,22 \text{ kcal/jam}$

Daya kompresor = 2,756 kW

Sehingga

$$\begin{aligned} \text{Kalor pengembunan} &= 14256,2 - (2,756 \times 860) \\ &= 12656,62 \text{ kcal/jam} \\ &= 14,717 \text{ kW} \end{aligned}$$

*Laju aliran udara pendingin*

Laju aliran udara pendingin yang diperlukan untuk mengembunkan uap refrigeran yang keluar dari kompresor pada kondensor berpendingin udara dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini :

Jumlah udara pendingin ( $\text{m}^3/\text{jam}$ )

$$m_{\text{udara}} = \frac{\text{kalor pengembunan} (\frac{\text{kcal}}{\text{jam}})}{0,28 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \times (T_{\text{udara out}} - T_{\text{udara in}})}$$

*(Penyegaran udara, Wiranto hal 144)*

$$m_{\text{udara}} = \frac{12656,62 \left( \frac{\text{kcal}}{\text{jam}} \right)}{0,28 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}} \times (35 - 27) ^\circ\text{C}}$$

$$m_{\text{udara}} = 5650 \text{ m}^3/\text{jam} \sim 1,56 \text{ m}^3/\text{s}$$

### V.3.5. Katup Ekspansi

Data Perancangan

- Pressure	= 15,5 bar
- Beban pendinginan <i>container</i>	= 16,577 kW
- Densitas refrigeran (liquid)	= 1146,7 kg/m <sup>3</sup>
- Konduktivitas refrigeran	= 0,074716 W/m <sup>2</sup> °C
- Viskositas kinematis refrigeran	= 0,001408 m <sup>2</sup> /s
- Diameter luar pipa ref / d <sub>o</sub>	= 0,0267 m
- Diameter dalam pipa ref / d <sub>i</sub>	= 0,0251 m
- Laju aliran refrigerant / satuan waktu	= 0,0847 kg/s

*Kapasitas refrigeran yang mengalir melalui katup ekspansi*

$$Q_{\text{ref}} = \frac{M_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}}}$$

$$Q_{\text{ref}} = \frac{0,084 \text{ kg/s}}{484,1 \text{ kg/m}^3}$$

$$Q_{\text{ref}} = 0,000074 \text{ m}^3/\text{s}$$

*Luas penampang pipa untuk bagian dalam (A<sub>i</sub>)*

$$A_i = \pi/4 \times (d_i)^2$$

$$A_i = \pi/4 \times (0,0251)^2$$

$$A_i = 0,00197 \text{ m}^2$$

*Laju aliran massa refrigeran per satuan luas penampang pipa*

$$G_{\text{ref}} = \frac{M_{\text{ref}}}{A_i}$$

$$G_{\text{ref}} = \frac{0,0847 \text{ kg/s}}{0,00197 \text{ m}^2}$$

$$G_{\text{ref}} = 43,04 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

*Angka Reynold (Re)*

$$Re = \frac{G_{\text{ref}} \times d_i}{\mu_{\text{ref}}}$$

$$Re = \frac{43,04 \times 0,0251}{0,001408}$$

$$Re = 771,65$$

*Beda Tekanan ( $\Delta P$ )*

$$\Delta P = P_{\text{cond}} - P_{\text{evap}}$$

dimana :  $P_{\text{con}}$  = tekanan di kondensor 15,5 bar

$P_{\text{eva}}$  = tekanan di evaporator 1,02 bar

$$\Delta P = P_{\text{con}} - P_{\text{eva}}$$

$$\Delta P = 15,5 - 1,02$$

$$\Delta P = 14,48 \text{ bar}$$

$$\Delta P = 1448,0 \text{ kPa}$$

$$\Delta P = 1448 \times 20,885$$

$$\Delta P = 30241,5 \text{ lb/ft}^2$$

$$\Delta P = 30241,5 \times 4,88$$

$$\Delta P = 147578,4 \text{ kg/m}^2$$

*Luas penampang orifice ( $A_{\text{orif}}$ )*

$$A_{\text{orif}} = \frac{Q_{\text{ref}}}{c \times \left[ 2 \times \frac{\Delta P}{\rho} \right]^{0,5}}$$

$$A_{\text{orif}} = \frac{0,000073}{0,7 \times \left[ 2 \times \frac{147578,4}{1146,7} \right]^{0,5}}$$

$$A_{\text{orif}} = 9,3 \times 10^{-5}$$

*Diameter Orifice ( $D_{\text{orf}}$ )*

$$D_{orf} = \sqrt{\frac{4 \times A_{orf}}{\pi}}$$

$$D_{orf} = \sqrt{\frac{4 \times 9,3E-05}{\pi}}$$

$$D_{orf} = 0,01088 \text{ m} \sim 10,88 \text{ mm}$$

Untuk resume perhitungan desain sistem refrigerasi dapat dilihat pada tabel V.16 sebagai berikut :

Tabel V.16 Resume perhitungan sistem refrigerasi

No.	Komponen	Perhitungan
1.	Evaporator	$Q_{load} = 16,577 \text{ kW}$
		$M_{ref} = 0,084 \text{ kg/s}$
2.	Fan Evaporator	$M_{ud} = 0,383 \text{ kg/s}$
		$Q_{fan} = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$
3.	Kompresor	$P_{comp} = 3,70 \text{ HP}$
4.	Kondensor	$Q_{cond} = 14,717 \text{ kW}$
		$M_{ud} = 1,56 \text{ m}^3/\text{s}$
5.	Katup ekspansi	$Q_{ref} = 0,000074 \text{ m}^3/\text{s}$
		$D_{orif} = 10,88 \text{ mm}$

## V.4. Estimasi Perhitungan Penghematan Biaya Operasional

### V.4.1. Perhitungan Laju Aliran Massa Refrigerant ( $m_{ref}$ )

Perhitungan laju aliran massa refrigerant dapat diketahui setelah beberapa parameter perancangan diketahui, dengan menggunakan persamaan :

$$M_{ref} = \frac{Q_{load}}{h_1 - h_4} (\text{kg/s})$$

Perhitungan pada data 1 (*Dengan PCM*) :

$$M_{ref} = \frac{16,577}{430 - 232} = 0,0837$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka nilai laju aliran massa refrigerant dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel V.17. Laju Aliran Massa Refrigerant

No.	M refrigerant (kg/s)	
	Dengan PCM	Tanpa PCM
1	0,0837	0,0828
2	0,0833	0,0845
3	0,0833	0,0800
4	0,0837	0,0850
5	0,0837	0,0854
6	0,0837	0,0854
7	0,0845	0,0850
8	0,0854	0,0824

#### V.4.2. Perhitungan Daya Kompresor

Pada perhitungan daya kompresor digunakan persamaan berikut :  $W_{\text{comp}} = m_{\text{ref}} \times (h_2 - h_1)$ , (kJ/kg),

Perhitungan pada data 1 (Dengan PCM) :

$$W_{\text{comp}} = 0,0837 \text{ kg/s} \times (451 - 430) \text{ kJ/kg}$$

$$W_{\text{comp}} = 1,758 \text{ kW}$$

Dengan persamaan yang sama, maka nilai resume perhitungan daya kompresor dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel V.18. Kebutuhan Daya Kompresor (Isentropis)

No.	Daya Kompresor (kW)	
	Dengan PCM	Tanpa PCM
1	1,7582	2,984
2	1,7493	2,706
3	1,8326	2,963
4	1,8419	3,230
5	1,6744	3,247



6	1,8419	3,247
7	1,8607	3,485
8	1,8799	3,299

Jika daya tersebut diatas merupakan daya kompresor isentropis atau pada kondisi entropi konstan, maka daya motor listrik penggerak kompresor yang diperlukan adalah

$$N' = \frac{N}{c \times m} \quad (\text{Penyegaran udara, Wiranto hal. 140})$$

Dimana N' = daya motor penggerak kompresor (kW)  
N = daya kompresor isentropi (kW)  
□ c = efisiensi kompresi (0,75)  
□ m = efisiensi mekanik, 90%

Dengan menggunakan persamaan yang sama, maka nilai resume perhitungan daya motor penggerak kompresor dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel V.19. Kebutuhan Daya Motor Penggerak Kompresor

No.	Daya Kompresor (kW)	
	Dengan PCM	Tanpa PCM
1	2,605	4,421
2	2,592	4,010
3	2,715	4,390
4	2,729	4,786
5	2,481	4,810
6	2,729	4,810
7	2,757	5,164
8	2,785	4,887

#### V.4.3. Perhitungan Total Kebutuhan Massa PCM

Diketahui :

$$Q_{\text{load}} = 16,577 \text{ kJ/s} = 656446 \text{ kJ}$$

$$\text{Heat of Fusion PCM(L)} = 200,5 \text{ kJ/kg}$$

(Sumber : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2015) hal. 327

$$Q_L = Q_{\text{PCM}}$$

$$656449 \text{ (kJ)} = m \times 200,5 \text{ (kJ/kg)}$$

$$m = \frac{656449}{200,5}$$

$$m = 3274,06 \text{ kg}$$

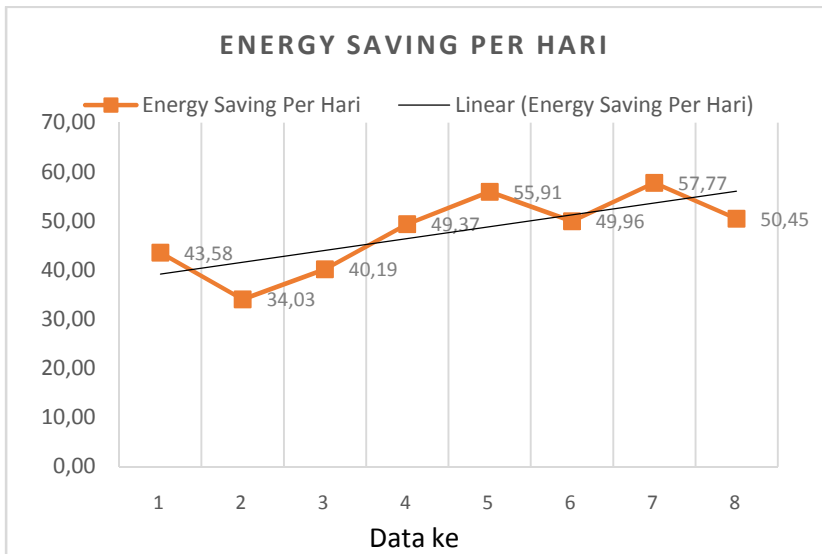
#### IV.4.4. Estimasi Perhitungan Penghematan Energi Kompresor

Pada sistem semi hybrid PCM, lama waktu kompresor menyala selama 24 jam per hari untuk proses pendinginan muatan di dalam ruang *reefer container*, sama dengan lama waktu kompresor bekerja pada mesin refrigerasi konvensional. Namun dengan adanya penambahan PCM pada komponen sistem refrigerasi nya, dapat diketahui bahwa daya kompresor yang dibutuhkan oleh sistem hybrid PCM ini menjadi lebih rendah dibandingkan mesin refrigerasi konvensional, sehingga besar energi kompresor yang dapat disimpan (*saving energy*) akibat adanya penambahan komponen PCM pada sistem refrigerasi semi hybrid ini dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel V.20. *Saving Energy* Kompresor Per Hari

Data	Masa PCM ( Kg )	Penghematan KWh per 1 jam pengoperasian	Penghematan kWh per 24 jam pengoperasian
1	3274,06	1,82	43,58
2	3274,06	1,42	34,03
3	3274,06	1,67	40,19

4	3274,06	2,06	49,37
5	3274,06	2,33	55,91
6	3274,06	2,08	49,96
7	3274,06	2,41	57,77
8	3274,06	2,10	50,45



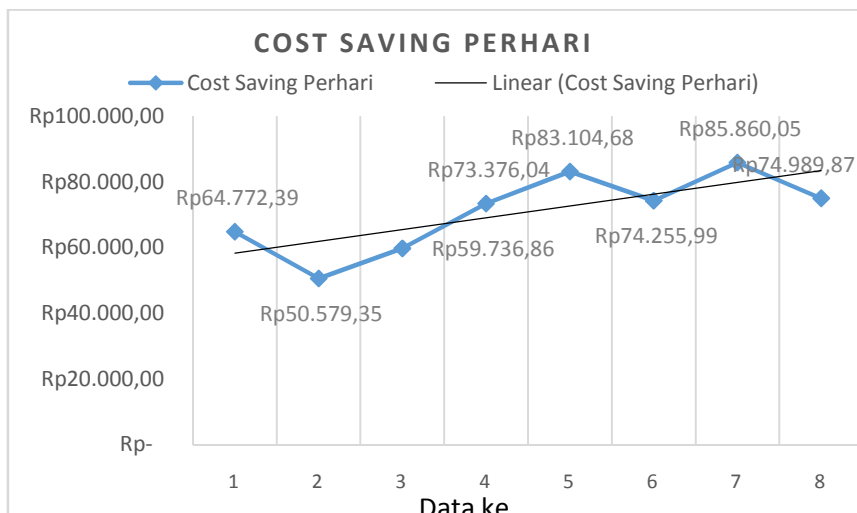
Gambar V.11 Grafik *Energy Saving* (kWh) Per Hari

Dari nilai penghematan kWh kompresor (karena adanya penambahan PCM), maka besar nominal rupiah yang dapat disimpan karena penghematan kebutuhan daya kompresor dapat dilihat pada tabel dibawah ini :

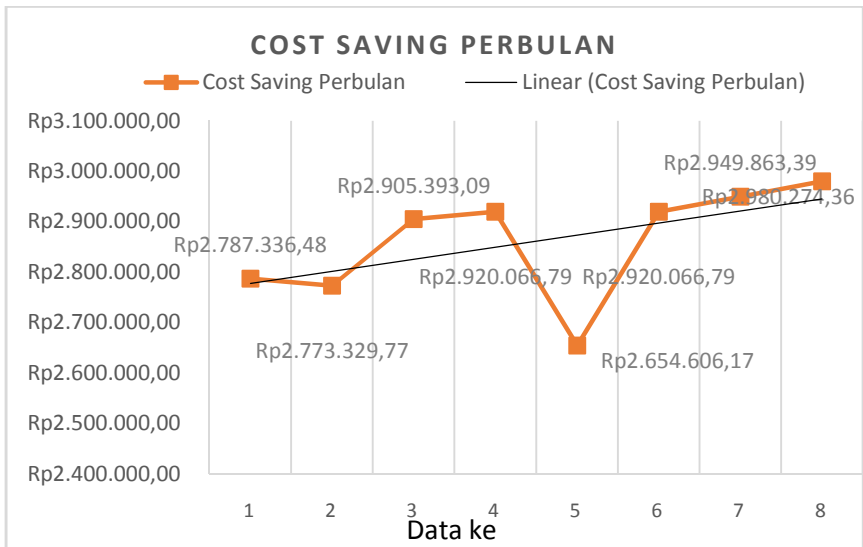
Tabel V.21. Penghematan Daya Kompresor

No	Masa PCM ( Kg )	Penghematan kWh per 24 jam pengoperasian	Penghematan per hari	Penghematan per bulan
1	3274,06	43,58	Rp 64.772,39	Rp 1.943.171,72
2	3274,06	34,03	Rp 50.579,35	Rp 1.517.380,62
3	3274,06	40,19	Rp 59.736,86	Rp 1.792.105,66
4	3274,06	49,37	Rp 73.376,04	Rp 2.201.281,12
5	3274,06	55,91	Rp 83.104,68	Rp 2.493.140,44
6	3274,06	49,96	Rp 74.255,99	Rp 2.227.679,82
7	3274,06	57,77	Rp 85.860,05	Rp 2.575.801,46
8	3274,06	50,45	Rp 74.989,87	Rp 2.249.696,02

*Catatan: Tarif Dasar Listrik yang dikeluarkan oleh PLN per Januari 2017 sebesar Rp. 1.486,28 per kWh.*



Gambar V.12. Grafik *Cost Saving* Per Hari



Gambar V.13. Grafik *Cost Saving* Per Bulan

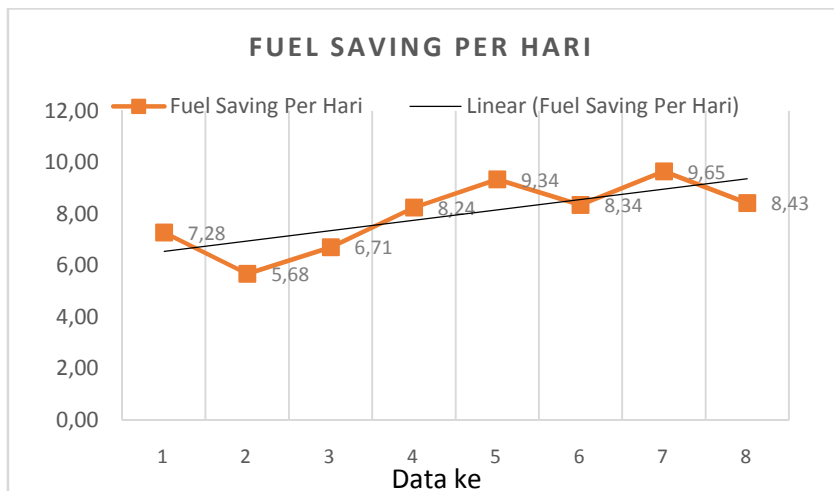
Aplikasi penggunaan *reefer container* ini direncanakan untuk penggunaan di kapal, sehingga besar biaya penghematan kebutuhan daya kompresor (karena adanya penambahan sistem hybrid PCM) dapat dikonversi ke penghematan jumlah konsumsi bahan bakar (*fuel saving*) per hari untuk kebutuhan generator set di kapalseperti yang tertera pada tabel dibawah ini

Tabel V.22. Penghematan Kebutuhan BBM Per Hari

No	Penghematan per hari	Penghematan Kebutuhan BBM di kapal per hari (liter)
1	Rp 64.772,39	7,28
2	Rp 50.579,35	5,68
3	Rp 59.736,86	6,71

4	Rp 73.376,04	8,24
5	Rp 83.104,68	9,34
6	Rp 74.255,99	8,34
7	Rp 85.860,05	9,65
8	Rp 74.989,87	8,43

Catatan: Harga BBM MDO Rp. 8.900,00 (Pertamina)



Gambar V.14. Grafik *Fuel Saving* Per Hari

## V.5. Analisa Ekonomis

Analisa ekonomis yang dilakukan merupakan analisa perhitungan untuk penambahan modifikasi pada *reefer container* berdimensi 20 feet yang mengangkut produk *frozen food*. Modifikasi yang dilakukan adalah dengan penambahan komponen penunjang PCM pada interior ruang pendinginannya. Dimensi *reefer container* yang digunakan berukuran 5555 x 2229 x 2429 (mm) atau standar 20 feet atau 1 TEU.

Adapun jumlah kebutuhan PCM yang digunakan merupakan perhitungan besarnya kalor yang harus diserap oleh PCM pada sistem refrigerasi. Berdasarkan hasil perhitungan didapatkan banyaknya PCM yang dibutuhkan pada perencanaan *reefer container* 20 feet ini sebesar 3274,06 kg. Besarnya biaya modal / *capital expenditures* meliputi: jasa instalasi pemasangan penambahan komponen PCM di kontainer, pembelian pipa evaporator tambahan, pembuatan rak/*pipe support* untuk instalasi PCM, dan total kebutuhan PCM dapat dihitung sebesar Rp. 247.301.367,87 (detail perhitungan pada bab lampiran)

Untuk konsep bisnis yang dapat dikembangkan guna mendapatkan *revenue* adalah dengan menyewakan *reefer container* yang telah dimodifikasi dengan sistem hybrid PCM tersebut kepada perusahaan pelayaran/pengguna jasa *reefer* kontainer untuk pengiriman barang. Besarnya biaya persewaan 1 unit *reefer container* seharga Rp. 12.000.000,00 (PT. Samudera Indonesia, 2016) per bulan atau Rp. 144.000.000,00 per tahun nya. Selanjutnya biaya yang diperoleh dari menyewakan unit *reefer container* ini dapat digunakan sebagai pembayaran untuk biaya modal awal, biaya maintenance kontainer serta biaya operasional (yang meliputi biaya listrik/konsumsi bahan bakar untuk genset kapal, serta pembelian stock / spare part untuk PCM).

Tabel V.23. Estimasi Perhitungan *Cash Flow* untuk Sistem Refrigerasi Hybrid PCM

No	Tahun ke-	Cash Flow	Cummulative Cashflow
1	Tahun 0	-Rp263.208.125,73	-Rp263.208.125,73
2	Tahun 1	Rp100.698.392,94	-Rp162.509.732,79
3	Tahun 2	Rp99.191.332,90	-Rp63.318.399,90
4	Tahun 3	Rp97.608.919,86	Rp34.290.519,96
5	Tahun 4	Rp95.947.386,17	Rp130.237.906,13
6	Tahun 5	Rp94.202.775,79	Rp224.440.681,92

7	Tahun 6	Rp92.370.934,89	Rp316.811.616,81
8	Tahun 7	Rp90.447.501,95	Rp407.259.118,76
9	Tahun 8	Rp88.427.897,36	Rp495.687.016,12
10	Tahun 9	Rp86.307.312,54	Rp581.994.328,66
11	Tahun 10	Rp84.080.698,49	Rp666.075.027,15

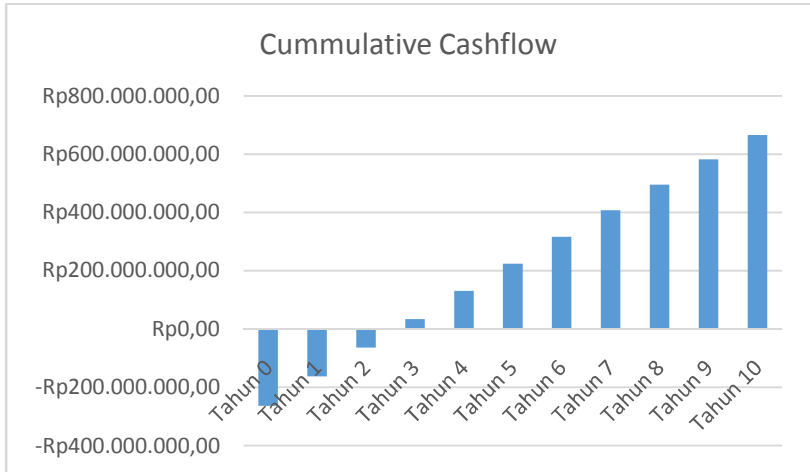
Tabel V.24. Estimasi Perhitungan *Cash Flow* untuk Sistem Refrigerasi Konvensional

No	Tahun ke-	Cash Flow	Cummulative Cashflow
1	Tahun 0	-Rp120.000.000,00	-Rp120.000.000,00
2	Tahun 1	Rp71.692.021,76	-Rp48.307.978,24
3	Tahun 2	Rp68.376.622,85	Rp20.068.644,61
4	Tahun 3	Rp64.895.453,99	Rp84.964.098,61
5	Tahun 4	Rp61.240.226,69	Rp146.204.325,30
6	Tahun 5	Rp57.402.238,03	Rp203.606.563,33
7	Tahun 6	Rp53.372.349,93	Rp256.978.913,26
8	Tahun 7	Rp49.140.967,43	Rp306.119.880,68
9	Tahun 8	Rp44.698.015,80	Rp350.817.896,48
10	Tahun 9	Rp40.032.916,59	Rp390.850.813,06
11	Tahun 10	Rp35.134.562,42	Rp425.985.375,48

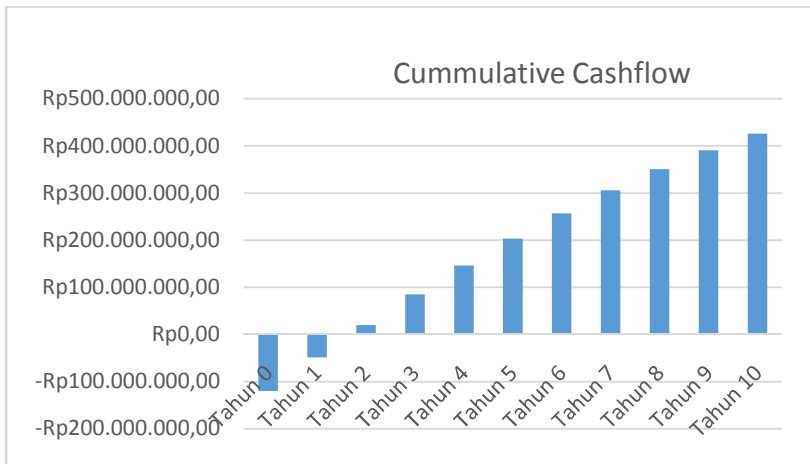
Berdasarkan perhitungan ekonomis pada tabel perhitungan *cash flow* untuk sistem refrigerasi hybrid dan sistem konvensional, dapat dilakukan analisa bahwa *reefer container 20 feet* yang dimodifikasi dengan sistem semi hybrid PCM, maka *payback period*/ balik modal terjadi pada tahun ke 3 sebesar Rp. 34.290.519,96 per kontainer, sedangkan *reefer container* dengan sistem konvensional, *payback preiod* dapat tercapai pada tahun ke dua sebesarRp.20.068.644,61. (detail perhitungan pada bab lampiran perhitungan ekonomis). Proyeksi *cummulative cash flow* modifikasi *reefer container 20 ft* dengan



sistem hybrid PCM pada tahun ke 5 dan seterusnya lebih tinggi dari pada *cummulative cash flow* pada *reefer container* konvensional. Proyeksi *cummulative cash flow* dapat dilihat pada grafik dibawah ini :



Gambar V.15. Grafik *Cummulative Cashflow* dengan Sistem Hybrid PCM



Gambar V.16. Grafik *Cummulative Cashflow* dengan Sistem Konvensional

Untuk memverifikasi analisa ekonomi pada tugas akhir ini dapat dilakukan dengan membuat gambaran mengenai estimasi laba yang diperoleh bagi perusahaan yang bergerak di bidang transportasi pelayaran atau *shipping company*. terkait keunggulan dan kekurangan dari masing masing penggunaan *reefer container*, baik dengan sistem hybrid PCM maupun sistem konvensional,

Tabel V.25. Estimasi Laba Pada Perbandingan Penggunaan *Reefer Container* Bagi Penyewa (*Shipper*)

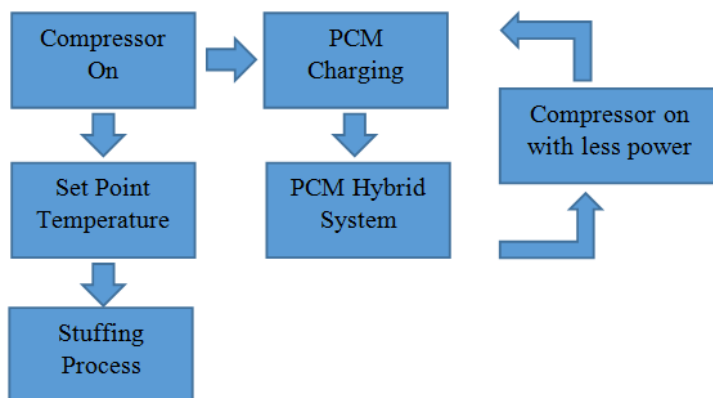
Item	<i>Reefer container</i>	
	Sistem Hybrid PCM	Sistem Konvensional
<b>I, Pendapatan</b>		
- Volume efektif kargo (%)	70 – 75%	75 – 80%
- Payload muatan (kg)	6883,46 kg	7112,87kg
- Estimasi penjualan produk per kg	Rp. 85.000,00	Rp. 85.000,00
Total pendapatan	Rp. 598.884.262	Rp. 604.594.217
<b>II, Pengeluaran</b>		
- Biaya sewa per bulan	Rp12.000.000,00	Rp12.000.000
- Maintenance cost	Rp600.000,00	Rp1.200.000
- Operasional	Rp374.061,93	Rp5.525.664,85
- Total Pengeluaran	Rp12.974.061,93	Rp18.725.664,85
<b>III. Estimasi Perolehan Laba*</b>	<b>Rp. 586.870.200,33</b>	<b>Rp. 585.868.552,27</b>

\* Belum termasuk pajak, dokumen export-import, biaya bea cukai, dan transportasi

## V. 6. Pembahasan

### V.6.1. Cara kerja mesin refrigerasi *reefer container 20 feet* dengan sistem hybrid PCM

Pada *reefer container 20 feet* selain menggunakan mesin refrigerasi dengan sistem konvensional, juga digunakan sistem hybrid PCM sebagai media penyimpan kalor laten agar temperatur produk di dalam ruang muat *reefer container* tetap terjaga. PCM atau *phase change material* yang umum digunakan berbentuk module module yang dipasang menempel pada pipa refrigerant / *evaporator tube*, dengan posisi penempatan module di dinding sisi atas / atap kontainer, penempatan module di atap bertujuan agar tidak terlalu banyak memakan *space* yang berakibat pada berkurangnya *payload* kontainer. Dan juga agar kemampuan PCM dalam menyerap beban kalor menjadi lebih maksimal.



Gambar V.17. Diagram blok cara kerja sistem hybrid PCM

Fungsi PCM pada sistem refrigerasi hybrid ini sendiri hanya untuk mempertahankan temperatur produk pada setting temperatur nya (*stabilizer*), dan bukan untuk membekukan / menurunkan temperatur muatan. Mula nya, PCM akan

dilakukan proses pembekuan terlebih dahulu (*charging*) selama rentang waktu tertentu, tergantung kapasitas muatan yang diangkut. Setelah proses *charging* selesai dan fasa PCM telah membeku/solid, maka beban kerja kompresor akan menurun/berkurang, karena sistem hybrid PCM mulai bekerja untuk mempertahankan temperatur produk tetap pada setting temperaturnya. Selama 24 jam operasional *reefer container*, kompresor dan PCM bekerja bersama sama untuk mengkondisikan temperatur muatan, sehingga biaya pemakaian energi kompresor dapat menjadi berkurang akibat adanya penambahan komponen sistem hybrid PCM ini.

## **V.6.2. Analisa Teknis Perancangan *Reefer Container***

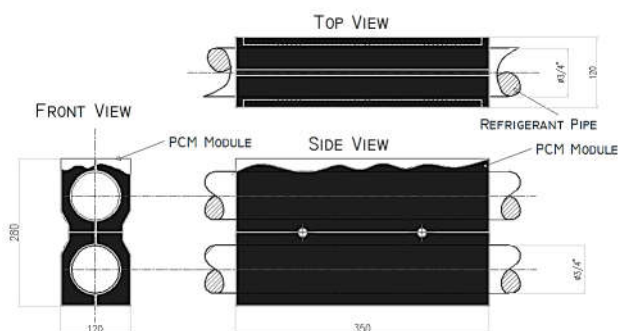
### **V.6.2.1. Pemipaan sistem refrigerasi(*refrigeration piping*)**

Menurut ASHRAE *Standard* B31.5 and ASHRAE *Standard* 15 yang membahas perihal persyaratan pemipaan di sistem refrigerasi, faktor faktor yang perlu menjadi pertimbangan dalam pemilihan material untuk pipa di sistem refrigerasi, yaitu:

- Biaya instalasi
- Tekanan dan temperatur fluida kerja
- Lingkungan eksternal pipa
- Jenis fluida kerja yang mengalir di dalam pipa

Berdasarkan persyaratan teknis tersebut, jenis pipa refrigerant yang sesuai untuk aplikasi sistem refrigerasi di *reefer container* adalah terbuat dari bahan atau material tembaga (*Copper, ASTM Standard B280*) karena pipa tersebut memiliki ketahanan yang baik terhadap masalah korosi, selain itu pipa tembaga maupun pipa paduan tembaga juga tergolong mudah dalam instalasi pemasangannya, dan sering digunakan untuk instalasi di sistem pengkondisian udara (HVAC), refrigerasi maupun supplay air.

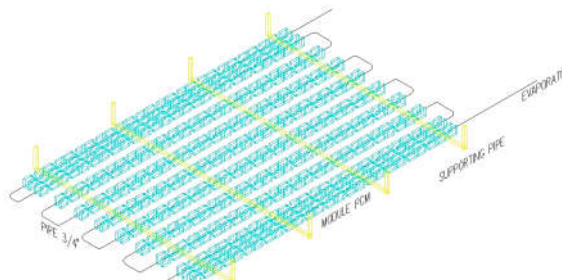
Dalam proses instalasi sistem refrigerasi *reefer container*, pipa tembaga dapat disambungkan satu sama lain (*joined*) cukup dengan disolder, dicor maupun menggunakan sambungan socket. Namun untuk aplikasi sistem refrigerasi maupun HVAC, jenis pipa tembaga ini penggunaannya pun terbatas, salah satunya ialah pipa dengan material tembaga tidak boleh digunakan untuk instalasi sistem dengan fluida refrigerant berbahan ammonia.



Gambar V.18. Perencanaan ukuran module PCM dan pipa refrigerant

Pada *reefer container* yang sedang dirancang dalam tugas akhir ini digunakan sistem refrigerasi hybrid PCM. Pada sistem hybrid, selain menggunakan kompresor sebagai komponen utama mesin refrigerasi nya, juga digunakan penambahan komponen utama yang lain, yaitu *phase change material*, dengan tujuan untuk mengurangi pemakaian daya kompresor yang berlebihan pada sistem pendingin di *reefer container*. Dengan total beban pendinginan yang harus diatas oleh mesin refrigerasi sebesar 16,57 kW, jumlah kebutuhan massa PCM pada *reefer container* ukuran 20 feet sebesar 3274,04 kg. Dimensi per module PCM yang digunakan 350 x 120 x 140 (mm). PCM yang digunakan termasuk dalam kategori euthectic dan berbahan dasar liquid, dengan

*freezing temperature* berkisar antara  $-30^{\circ}\text{C}$  sampai  $0^{\circ}\text{C}$  untuk muatan produk berupa *frozen food*. Untuk pipa refrigerant yang digunakan berukuran  $\frac{3}{4}$  inchi dengan material terbuat dari tembaga. Adapun peletakan atau *arrangement* PCM ini sendiri dipasang pada bagian dinding sisi atas *reefer container*, yang menempel/menyelubungi *evaporator tube* (pipa refrigerant) sepanjang ruang kargo efektif kontainer tersebut. Pertimbangan dalam pemilihan peletakan module PCM pada pipa pipa evaporator adalah efektifitas PCM dalam penyerapan kalor di ruang kontainer dan juga agar tidak mengurangi *space volume* kargo yang terlalu besar.



Gambar V.19. Perencanaan peletakan module PCM pada *evaporator tube*

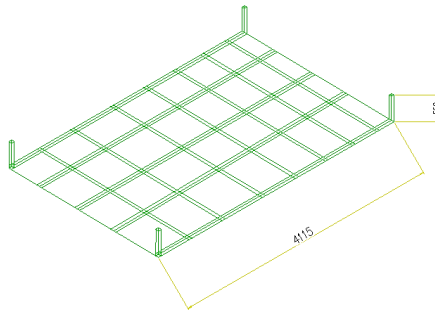
#### V.6.2.2. Komponen penunjang pipa (*pipe supporting elements*)

Pada aplikasi *reefer container*, pipa refrigerant (*evaporator tube*) dipasang membentang dari bagian belakang (dekat ruang kompresor) hingga ke bagian depan (dekat pintu kontainer). Bagian bagian yang termasuk elemen pendukung pipa refrigerant antara lain : (1) *hanger*/gantungan (untuk mensupport pipa dari atas), dan (2) *supporting pipe*, untuk menahan beban pipa dari bawah.

Elemen pipa pendukung tersebut diharapkan mampu menahan semua beban saat kondisi statis dan dinamis, karena nantinya *reefer container* ini diaplikasikan sebagai wadah mengangkut

muatan di kapal, dimana beban statis dan dinamis yang terjadi pada pipa pipa refrigerant ini antara lain :

- a. Berat pipa tembaga, aksesoris pipa (katup, fitting, joint) insulasi, fluida yang mengalir serta beban massa akibat penambahan komponen module module PCM sepanjang pipa refrigerant.
- b. Beban yang diakibatkan perubahan cuaca eksternal seperti es/salju, musim semi, angin, gelombang / ombak, dan kekuatan gempa.
- c. Beban lain yang berpengaruh seperti getaran dan guncangan ketika proses bongkar muat di pelabuhan.



Gambar V.20. Perencanaan *supporting pipe elements*

Untuk menahan beban massa yang besar karena adanya penambahan 3274,06 kg PCM di dinding atas *reefer container* maka perlu dipasang *supporting elements* pada bagian bawah *evaporator tube*. *Supporting elements*/pipa penahan terbuat dari material stainless steel dan dipasang sepanjang ruang kontainer, dengan perencanaan ukuran seperti pada gambar V.20. Pemilihan stainless steel sebagai pipa penahan karena material tersebut memiliki konstruksi yang lebih ringan, mudah dalam pemasangan instalasi serta memiliki ketahanan yang baik terhadap korosi. Selain untuk menahan beban massa PCM, pipa penahan tersebut juga berfungsi untuk menghindari kontak langsung antara evaporator tube dan module PCM dengan alat bongkar muat (forklift) yang keluar masuk ruang

kontainer ketika sedang proses *stuffing* / *unstuffing* muatan produk di *warehouse* atau *store* agar tidak bersenggolan, yang dapat mengakibatkan module PCM atau pipa evaporator menjadi bocor.

#### V.6.2.3. Bahan insulasi termal (*Insulation thermal*)

Insulasi digunakan untuk membatasi penambahan panas (pada aplikasi sistem pendingin) maupun kerugian panas (pada aplikasi sistem pemanas) yang terjadi akibat perbedaan temperatur antara dua material/benda. Untuk aplikasi sistem refrigerasi di *reefer container*, pemilihan insulasi thermal yang baik diharapkan mampu mengurangi besarnya perpindahan panas dari lingkungan luar ke dalam ruang pendingin kontainer melalui dinding, sehingga tidak menambah beban pendinginan yang harus diatasi oleh kerja mesin refrigerasi dalam mengkondisikan temperatur muatan di dalam ruang kontainer.

Menurut ASHRAE *Chapter 26*, 2005 tentang *Insulation For Mechanical System*, beberapa catatan dalam perencanaan insulasi yang baik harus mempertimbangkan aspek aspek berikut :

1. *Energi Conservation*,

Pada umumnya, insulasi thermal digunakan untuk mereduksi konsumsi energi, baik pada sistem refrigerasi, HVAC, perpipaan maupun peralatan mekanik yang lain. Sehingga bahan / material yang dipilih sebagai insulator haruslah bahan yang mampu menjaga agar sebuah obyek, dalam hal ini *reefer container* tidak terjadi penambahan panas dari lingkungan luar yang berakibat meningkatnya konsumsi energi untuk membuang penambahan panas yang masuk dari luar tersebut.

2. *Properties material sebagai insulator*,

Syarat syarat pemilihan material sebagai bahan insulasi adalah: (1) Konduktivitas termal, (2) Operating temperature, (3) Kemampuan menyerap air, (4)



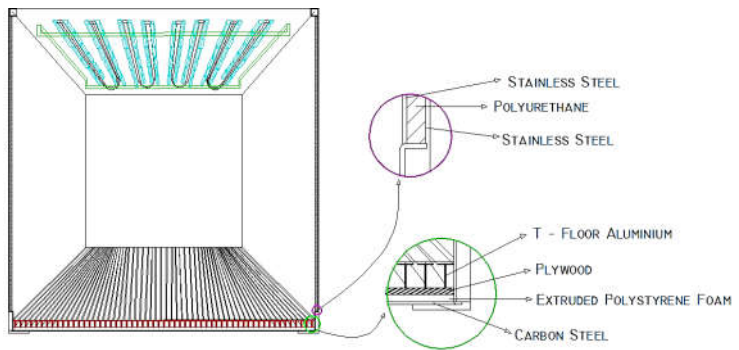
Kemampuan meredam getaran atau kebisingan (*noise control*)

3. Analisa Ekonomi,

Harga dalam pemilihan material insulasi dapat digunakan sebagai (1) patokan untuk memilih ketebalan insulasi yang paling maksimum (2) mengevaluasi atau membandingkan dua atau lebih bahan insulasi dengan biaya yang minimal untuk tingkat thermal performance yang lebih baik, (3) menentukan solusi biaya yang paling efektif untuk bahan insulasi selama periode waktu tertentu.

4. *Condensation control*

Untuk aplikasi sistem pendingin, penggunaan bahan insulasi bertujuan untuk menghindari kondensasi pada permukaan material / benda, serta menjaga temperatur permukaan diatas temperatur pengembunannya.

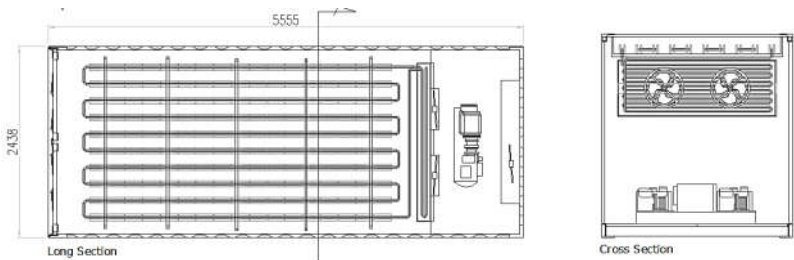


Gambar V.21. Perencanaan bahan insulasi *reefer container*

Pada *reefer container* yang sedang dirancang dalam tugas akhir ini, bahan material yang dipilih sebagai lapisan insulasi dinding dapat dilihat pada gambar V.20 diatas. Pada dinding sisi samping, belakang dan atas tersusun atas material

*stainless steel – polyurethane – stainless steel*, dengan ketebalan masing masing insulasi 10 – 60 – 10 (mm). Sedangkan pada sisi alas / *floor*, material insulasi tersusun atas *Carbon Steel – Extruded Polystyrene Foam – Plywood – T Floor Aluminium* dengan ketebalan masing masing 1 - 10 - 10 - 50 (mm). Pemilihan material/bahan insulasi pada sisi alas kontainer berbeda dengan sisi yang lain, karena selain harus mampu membatasi penambahan panas pada bagian sisi bawah kontainer, material tersebut juga harus mampu menahan beban yang ditimbulkan karena adanya penambahan berat diatas nya, seperti berat produk maupun berat orang dan peralatan ketika proses *stuffing unstuffing* dan juga pada sisi bawah *reefer container* umumnya digunakan sebagai jalur sirkulasi udara dingin yang dihembuskan oleh fan evaporator pada *reefer container* dengan metode pendinginan *indirrect cooling*.

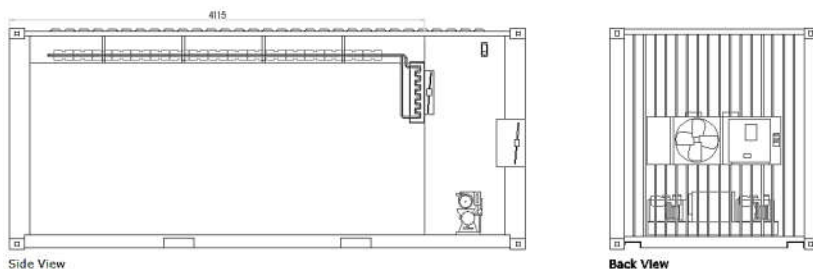
#### V.6.2.4. Layout Reefer Container



Gambar V.22. Layout reefer container  
(Long section and Cross Section)

Pada sistem refrigerasi hybrid PCM, dimensi *reefer container* yang dirancang dalam tugas akhir ini mengacu pada standard ISO untuk *marine refrigerated container 20 feet* (1 TEU), dengan berukuran 5555 x 2249 x 2438 (mm), dengan volume efektif kargo yang dapat dimuat sebesar 70% dari volume total kontainer, dengan mempertimbangkan beberapa

hal seperti : (1). Space ruang untuk kompresor dan kondensor, (2). Instalasi pipa refrigerant, (3). Penempatan module module PCM pada *evaporator tube*, (4). Lashing atau pengikatan kardus muatan, (5). Penambahan konstruksi *supporting pipe elements*.Pipa pipa evaporator untuk refrigerant dipasang sepanjang ruang muat kargo, dan dilengkapi dengan penambahan module module PCM disisi sisi nya. Kompresor diletakkan pada ruang tersendiri di belakang ruang kargo. Pada sistem refrigerasi hybrid, besar energi kompresor yang dibutuhkan sebesar 2,75 kW, sedangkan pada sistem konvensional sebesar 5,16 kW.



Gambar V.23. Layout *reefer container*  
(*Side View and Back View*)

Pada gambar V.23 diatas, panjang ruang efektif kargo yang direncanakan sebesar 4115 mm, dan jarak ketinggian antara dinding sisi atas dengan pipa pendukung sebesar 550 mm. Penyerapan panas dan pendinginan pada muatan kargo atau sumber panas yang lain dilakukan secara langsung (*direct cooling*) oleh module module PCM yang diletakkan sepanjang *evaporator tube*. Sistem refrigerasi hybrid PCM *reefer container* yang dirancang ini merupakan modifikasi dari sistem konvensional. Adanya 2 buah kipas/fan yang terpasang pada evaporator berfungsi untuk sirkulasi udara dingin yang dihembuskan melalui *T-Floor*, karena pada sistem refrigerasi

konvensional proses pendinginan dilakukan secara tidak langsung (*indirect cooling*). Unit kondensor (*condensing unit*) dipasang pada bagian paling belakang dari *container*. Jenis kondensor yang umum digunakan pada *marine reefer container* adalah *air cooled condensor*, dengan menggunakan media fluida udara untuk mendinginkan refrigerant yang bersirkulasi di dalam sistem refrigerasi.

Tabel V.26. Perbandingan Sistem Refrigerasi Konvensional dan Sistem Hybrid PCM

Item Perbandingan	Sistem Konvensional	Sistem Hybrid PCM
Komponen utama sistem refrigerasi	Evap, cond, comp, exp. valve	Sistem Konvensional + PCM
<i>Cooling method</i>	<i>Indirect cooling</i>	<i>Direct cooling</i>
Massa PCM	0 kg	3274,06 kg
Energi kompresor	5,164 kW	2,757 kW
Konsumsi bahan bakar per hari	620,86 liter	331,45 liter
Biaya kompresor per hari	Rp. 5.525.664,85	Rp. 2.949.863,39
Payload muatan	6883,46 kg	7112,87 kg
<i>Capital Expenditures</i>	Rp. 120.000.000,00	Rp. 263.208.125,73
<i>Operational Expenditures</i>	Rp. 66.307.978,24	Rp. 4.488.743,18

### V.6.3. Kelebihan dan kekurangan sistem hybrid PCM

#### 1. Kelebihan

Beberapa keuntungan dari penggunaan *reefer container* dengan sistem hybrid PCM dibandingkan dengan *reefer container* dengan sistem refrigerasi konvensional pada kapal antara lain :

- *Saving energy,*

Kerja kompresor pada sistem hybrid ini dapat dikurangi akibat adanya penambahan module module *phase change material* yang terpasang pada komponen sistem refrigerasi. Sehingga kerja kompresor untuk mengkondisikan temperatur muatan menjadi lebih berkurang.

- *Cost saving,*

Berkurangnya daya kompresor untuk kebutuhan sistem refrigerasi di *reefer container*, hal tersebut berdampak pada pengurangan / penghematan biaya yang ditimbulkan akibat adanya pemakaian daya listrik di kapal sebagai sumber listrik untuk generator set di kapal. Sehingga biaya operasional untuk *reefer container* dengan sistem hybrid PCM menjadi lebih rendah.

- *Fuel saving,*

Padaaplikasi penggunaan *reefer container* di kapal, penggunaan daya listrik akan berdampak pada pemakaian atau konsumsi bahan bakar (MDO) generator set. Jika pemakaian daya listrik di kapal berkurang, maka kebutuhan untuk konsumsi bahan bakar akan berkurang. Sehingga apabila 1 *reefer container* menggunakan sistem hybrid PCM saja dapat menghemat bahan bakar genset hingga 9,65 liter per hari, maka 1 kapal kontainer yang misalkan mengangkut 1000 TEUS *reefer container* diprediksi mampu menghemat pemakaian hingga 9650 liter bahan bakar per hari atau setara dengan 10 m<sup>3</sup> volume tangki bahan bakar per hari.

- *Payload kapal*

Karena penggunaan *reefer container* dengan sistem hybrid PCM dapat menghemat pemakaian bahan bakar di kapal, tentunya hal tersebut akan berdampak pada DWT kapal akibat adanya muatan bahan bakar ( $W_{fo}$ ) menjadi berkurang, sehingga pada displacement kapal yang sama, jumlah payload / muatan

kapal dapat ditambah, dan keuntungan yang diperoleh juga akan meningkat jika payload kapal bertambah.

- *Cummulative Cash Flow*

Biaya operasional untuk *reefer container* dengan sistem hybrid PCM jauh lebih murah dibandingkan dengan sistem konvensional. Sehingga pada analisa ekonomis yang telah dilakukan proyeksi *cummulative cash flow* modifikasi reefer container 20 ft dengan sistem hybrid PCM pada tahun ke 5 hingga tahun ke 10 lebih tinggi dari pada *cummulative cash flow* pada *reefer container* konvensional.

2. Beberapa kekurangan yang timbul sebagai akibat dari modifikasi *reefer container* ini antara lain :

- Berkurangnya *payload* kontainer

Pada *reefer container* dengan sistem hybrid PCM, dibutuhkan *space* tambahan untuk pemasangan *evaporator tube*, *support pipe*, *module PCM*, pengikatan muatan (*lashing*), sehingga hal tersebut dapat mengurangi dapat mengurangi ruang penyimpanan muatan / *payload* dari kontainer.

- *Income*

Karena adanya penambahan komponen PCM menyebabkan *payload* kontainer berkurang, sehingga total pendapatan yang diperoleh dari penjualan produk pada satu *reefer container* dengan sistem hybrid PCM sedikit lebih rendah dibandingkan pendapatan yang diperoleh dari produk pada *reefer container* konvensional, karena berkurangnya muatan / *payload* tersebut.

- Efek terhadap *loading & unloading*

Umumnya kegiatan *loading unloading reefer ship* atau kapal yang mengangkut kontainer biasa maupun *reefer container* dilakukan dengan bantuan crane pelabuhan. Untuk *reefer container* dengan menggunakan sistem hybrid PCM, diketahui bahwa adanya penambahan komponen / instalasi PCM pada ruang pendinginan utama *reefer container*, tentunya

memerlukan perhatian khusus, karena adanya guncangan yang berlebih ketika proses *loading unloading* oleh crane (ketika di pelabuhan) / forklift (ketika loading unloading di darat) dapat mengakibatkan muatan produk dan module PCM yang terpasang di dinding sisi atas kontainer menjadi bersenggolan, yang akan menyebabkan module PCM dan *evaporator tube* patah / bocor. Sehingga hal yang perlu diperhatikan adalah pemilihan komponen material yang baik untuk aplikasi penggunaan di kapal, penataan muatan di dalam ruang pendinginan *reefer container*, dan juga jumlah kapasitas muatan maksimal yang dapat diangkut / dimasukkan ke dalam ruang pendinginan agar tidak melebihi batas.

- Biaya Investasi Awal

Bagi perusahaan penyedia jasa pelayanan kontainer (*container maker*) maupun *shipping company*, biaya modal awal/*capital expenditures* yang dibutuhkan dan harus dikeluarkan untuk memodifikasi 1 unit *reefer container* konvensional menjadi *reefer container* dengan sistem hybrid PCM lebih mahal 2 kali lipat dibandingkan dengan apabila perusahaan tersebut membeli 1 unit *reefer container* baru dengan mesin refrigerasi konvensional.

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

Dari analisa dan pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang sesuai dengan tujuan penelitian pada penulisan tugas akhir ini. Saran-saran berisi tentang anjuran penulis bagi kelanjutan perbaikan dalam penelitian tugas akhir ini.

#### **VI.1 Kesimpulan**

1. Pada desain *reefer container* dengan sistem refrigerasi hybrid PCM, terdiri dari beberapa komponen utama yaitu kompresor, kondensor, *expansion valve*, evaporator serta *phase chnage material*. PCM dipasang menempel pada evaporator dan digunakan untuk mempertahankan temperatur produk yang diangkut berupa *frozen food* tetap pada temperatur yang telah di set yaitu  $-18^{\circ}\text{C}$ . Metode pendinginan yang digunakan adalah *dirrect cooling* dengan tujuan untuk lebih mengoptimalkan module PCM dalam penyerapan maupun pelepasan kalor di ruang kontainer. Selama pengoperasian mesin refrigerasi selama 24 jam per hari, kompresor tetap dalam kondisi menyala/on, namun dengan adanya penambahan instalasi PCM pada sistem refrigerasinya, mampu mengurangi kebutuhan pemakaian daya listrik kompresor itu sendiri.
2. Pada desain *reefer container* dengan sistem refrigerasi hybrid PCM ukuran 20 feet yang dirancang pada tugas akhir ini, dihasilkan nilai *cooling capacity* sebesar 16,57 kW, dengan daya kompresor yang dibutuhkan sebesar 2,757 kW per kontainer per hari. Untuk jenis refrigerant yang dipakai adalah R404a, dengan data perancangan meliputi *low pressure compressor* 1,05 bar, *high pressure* 15,5 bar, temperatur evaporasi =  $35^{\circ}\text{C}$  dan temperatur



kondensasi = 62 °C, serta penambahan massa PCM pada instalasi sistem refrigerasinya sebesar 32704,4 kg.

3. Hasil yang diperoleh pada perancangan sistem refrigerasi adalah dengan penambahan sebesar 3274,06 kg massa PCM, membutuhkan konsumsi bahan bakar sebesar 331,45 liter per hari kontainer pada sistem refrigerasi dengan hybrid PCM, dibandingkan sistem konvensional yang membutuhkan 620,8 liter per hari. Pada sistem hybrid energi kompresor sebesar 2,75 kW dengan payload muatan 6883,46 kg. Sedangkan pada sistem konvensional dengan payload kontainer 7112,8 kg dibutuhkan energi kompresor sebesar 5,16 kW.

## **VI.2 Saran**

1. Perlu penelitian lebih lanjut tentang kompensasi biaya ekonomis *fuel saving* pada penggunaan *reefer container* dengan sistem hybrid PCM terhadap volume bahan bakar dan penambahan muatan/payload di kapal.
2. Perlu dilakukan pemilihan spesifikasi dan material untuk komponen mesin pendingin yang sesuai

## Daftar Pustaka

- Ahuja, Akhsay & Ramachandran, “*Review on Phase Change Material as Thermal Energy Storage for Cooling*”. International Journal of ChemTech Research, 2016,9(4), pp 192-196.
- ASHRAE Safety Standard for Refrigeration System, 2005
- Daikin Air Conditioning Reefer Product, Japan, 2015
- E. Oro et all, *Improving thermal performance of freezer using phase change material*, International Journal of Refrigeration 35 (2012), hal. 984 - 991
- <http://atandsonline.com/informative-articles/benefits-of-all-electric-systems-over-diesel-trailer-storage/> (diakses pada tanggal 23 Agustus 2016)
- <https://www.cma-cgm.com/products-services/reefer/containers-fleet> (diakses pada tanggal 22 Agustus 2016)
- <http://est-international.com> (diakses pada tanggal 10 Oktober 2016)
- <http://www.rgees.com/technology.php> (diakses pada tanggal 25 Juli 2016)
- George E. K., Mustaghfirin A, Santoso M. “Modul Sistem Refrigerasi dan Perawatannya”, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, 2015
- Gracia, Alvaro & Luis F. Cabeza, “*Phase change materials and thermal energy storage for buildings*”. Energy and Buildings, 2015 (103), pp 414-419
- Hamburg SUD. (2010). “*Reefer Guide : Stay Cool We Care*”. Hamburg: Hamburg SUD Cooperation
- J.P. Holman, “Perpindahan Kalor” terjemahan Ir. Jafji M.Sc, Erlangga, 1994

- Lalit M. Bal, *"Phase change materials thermal energy storage medium and its applications"*. Advances in Material and Manufacturing Technology, 2015 Vol. 4 (10). pp 34-37
- Mansoor, Ahmed et al. *"Design and Fabrication of Cold Storage plant using Phase Change Material"*, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology Vol 2, Issues 9, 2013
- Namjoshi et. al. *"Use of Phase Change Material to Improve Performance in Direct Cool Refrigerators"*. International Journal of Advanced Engineering and Innovative Technology
- Olubunmi, Agbanigo. *"Master Thesis: Impact of Phase Change Materials on Energy Savings of Renewable Energy Technologies"*. Strathclyde University. 2012
- Rahman Reza et. al. *Performance Improvement of a Domestic Refrigerator Using Phase Change Material (PCM)*. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering No. 1 Vol. 3, Tahun 2016.
- Yusufoglu, et.al *Improving Performance of Household Refrigerators by Incorporating Phase Change Material*. International Journal of Refrigeration 57 (2015)
- Wilbert F Stoecker, J. Jones, *Refrigeration and Air Conditioning Second Edition*, Erlangga, terjemahan Ir. Supratman Hara
- Wiranto Arismunandar, Heizo Kato, *Penyegaran Udara*, Pradnya Paramita Jakarta, 1994

## BIODATA PENULIS



Herdito Haryowidagdo atau biasa dipanggil Dito lahir di Surabaya, 4 Desember 1991. Penulis merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal terakhir di Program Diploma III Jurusan Teknik Permesinan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS – ITS) pada tahun 2010 dan lulus pada tahun 2013. Lulus dari PPNS, penulis bekerja di perusahaan offshore shipping, Saka Energy Pangkah Ltd. di Surabaya sebagai

Technical Administration Staff mulai bulan November 2013 hingga 30 April 2014. Kemudian pada tanggal 02 Mei 2014, penulis diterima sebagai Tenaga Kependidikan di ITS Surabaya dengan posisi sebagai Teknisi Laboratorium Jurusan Transportasi Laut, kemudian dipindah menjadi Pengadministrasi Kemahasiswaan dan Alumni pada unit Fakultas Teknologi Kelautan ITS dan terakhir penulis mengemban posisi sebagai Pemroses Mutasi Kepegawaian di unit yang sama terhitung mulai tanggal 13 Maret 2015 hingga sekarang, Pada Januari 2015, penulis terdaftar sebagai mahasiswa Program Sarjana Lintas Jalur di Jurusan Teknik Sistem Perkapalan ITS. Selama menempuh pendidikan dan perkuliahan di ITS, penulis menyukai mata kuliah yang berhubungan dengan *fluid machinery*, dan *refrigeration system*. Oleh karena itu pada skripsi ini penulis mengambil judul Tugas Akhir yang sesuai dengan *research interest* dari penulis.

Herdito Haryowidagdo

4214106009

herdito@its.ac.id / herditowidagdo@gmail.com

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*